MATERIALES UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE TERRAPLENES ALIGERADOS DESTINADOS A OBRAS VIALES.



MARÍANGÉLICA MATEUS ROMERO



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO
2023

MATERIALES UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE TERRAPLENES ALIGERADOS DESTINADOS A OBRAS VIALES.

MARÍANGÉLICA MATEUS ROMERO

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil

Director
I.C. JUAN MANUEL SALGADO DÍAZ, MSc.

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO
2023

Autoridades Académicas

P. José Gabriel Mesa Angulo, O. P.
Rector General

P. Eduardo González Gil, O. P.
Vicerrector Académico General

P. José Antonio Balaguera Cepeda, O. P.
Rector Sede Villavicencio

P. Rodrigo García Jara, O. P.
Vicerrector Académico Sede Villavicencio

MG. Julieth Andrea Sierra Tobón
Secretaria de División Sede Villavicencio

Ing. Luis Fernando Diaz Cruz, Mg.
Decano de la Facultad Ingeniería Civil

Dedicatoria

La principal dedicatoria es primero que todo a Dios por guiarme siempre y darme la fuerza para seguir adelante sin dejar que desfallezca en cada uno de mis objetivos, a mis padres por darme su apoyo y fortaleza a lo largo de mis estudios, a mis amigos que siempre han estado a mi lado y demás personas que hicieron parte de mi proceso como estudiante.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por darme la salud y la fortaleza en cada situación que he pasado y a mis padres por todo el esfuerzo que han hecho para sacar mi carrera adelante y por último, agradecerle a la Universidad Santo Tomas y a los docentes que hicieron parte de mi formación como estudiante en camino a ser un profesional, en especial al Ingeniero Juan Manuel Salgado Diaz, mi director quien contribuyó al desarrollo del trabajo, quien me facilito la búsqueda de la literatura, la asistencia en la preparación de la información, las sugerencias útiles y todo lo plasmado en este documento.

Contenido

Pág.

7
MATERIALES PARA TERRAPLENES ALIGERADOS EN OBRAS VIALES

Lista de Tablas

Pág.

Lista de Figuras

Pág.

Resumen

Esta monografía expone una revisión bibliográfica de los Materiales utilizados en la construcción de terraplenes aligerados destinados a obras viales. La realización de un proyecto vial requiere de diferentes etapas que permitan una buena planeación y diseño ante la presencia de suelos arcillosos, orgánicos, volcánicos y expansivos tomando alternativas que no generen mayores sobrecostos y retrasos dando como solución la construcción de terraplenes aligerados, con materiales que permitan evitar sobrecargas al suelo de cimentación y cambios en las propiedades químicas y biológicas del suelo que generen problemas al medio ambiente. Con base a esto, se hará un análisis de los materiales existentes y ecológicos que permiten la conformación de un terraplén aligerado con excelente prestaciones y bajos costos, conociendo todo su funcionamiento y su proceso de construcción, finalmente se tiene como fin que el documento sea un punto de inicio con ayuda del estado del arte para futuros proyectos, a partir de materiales que se han implementado en la vida real.

Palabras Clave: Resistencia, Compactación, Estabilidad, Terraplén, Deformabilidad, Suelo.

Abstract

This monograph exposes a bibliographic review of the Materials used in the construction of lightened embankments destined for road works. The realization of a road project requires different stages that allow good planning and design in the presence of clayey, organic, volcanic and expansive soils, taking alternatives that do not generate greater cost overruns and delays, giving as a solution the construction of lightened embankments, with materials that Avoid overloading the foundation soil and changes in the chemical and biological properties of the soil that generate problems for the environment. Based on this, an analysis of the existing and ecological materials that allow the conformation of a lightened embankment with excellent benefits and low costs will be made, knowing all its operation and its construction process, finally the purpose is that the document is a starting point with the help of the state of the art for future projects, from materials that have been implemented in real life.

Key Word- *Resistance, compaction, stability, embankment, deformability, soil.*

.

Glosario

ASTM-D6270-08: American Society for Testing and Materials.

CEDEX: Laboratorio de Geotecnia del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.

INVIAS: Instituto Nacional de Vías.

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials.

RCD: Residuos de Construcción y Demolición.

Introducción

En la construcción de infraestructura vial, es común encontrar distintos tipos de terreno con propiedades diferentes. Para garantizar la estabilidad y resistencia del terraplén aligerado, es necesario contar con un diseño adecuado y materiales que cumplan con las especificaciones requeridas para la construcción de la vía. Esto no solo garantiza la seguridad y comodidad vial durante el periodo para el que fue diseñada la vía, sino que también puede generar empleo y abrir nuevos ingresos a nivel nacional e internacional, en línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en especial el de industria, innovación e infraestructura.

La implementación de tecnologías innovadoras y materiales livianos, que aprovechen la mano de obra y simplifiquen la planificación, puede permitir cumplir con las metas establecidas en cuanto a recursos económicos y de tiempo. Para ello, es importante realizar una revisión bibliográfica exhaustiva sobre los tipos de materiales utilizados en la construcción de terraplenes aligerados y analizar el comportamiento de cada uno de ellos.

Esta monografía se divide en tres etapas. En la primera etapa, se realizará una revisión bibliográfica detallada de artículos, tesis e informes relacionados con el tema. En la segunda etapa, se llevará a cabo un estudio y análisis de los materiales encontrados y, finalmente, en la tercera etapa, se presentarán las conclusiones y recomendaciones basadas en los hallazgos de la investigación.

Planteamiento del problema

A medida que los procesos geomorfológicos y climáticos afectan la tierra, se forman depósitos sedimentarios que se caracterizan por su medio de transporte y meteorización. La clasificación de estos depósitos, su granulometría, forma y tamaño, dependen del medio de transporte que los origina. Por lo tanto, al conocer dichos factores, se pueden prever la disposición y geometría del depósito, sus propiedades físicas y otros aspectos de interés en ingeniería geológica.

Cada tipo de depósito sedimentario tiene características y problemáticas únicas que pueden afectar su uso en proyectos de ingeniería. Por ejemplo, los litorales pueden sufrir erosión costera y cambios en la morfología de la playa, mientras que los glaciares pueden contener bloques de roca sueltos y material fino, lo que dificulta la compactación. En climas áridos y desérticos, pueden ser extremadamente secos y presentar problemas de estabilidad en pendientes pronunciadas. Por otro lado, los evaporíticos son altamente solubles y pueden disolverse con la exposición al agua. Los de climas tropicales pueden ser muy arcillosos y susceptibles a la erosión, mientras que los de origen volcánico pueden contener rocas y cenizas que dificultan la compactación y la estabilidad. Además, los coluviales pueden ser inestables y presentar problemas de deslizamientos, mientras que los aluviales pueden estar mal consolidados y presentar problemas de asentamiento. Finalmente, los lacustres pueden ser muy blandos y presentar problemas de estabilidad y resistencia a la compresión. Es importante conocer estas problemáticas para poder aplicar las técnicas y materiales adecuados en la construcción de obras viales en estos depósitos sedimentarios (Gonzáles de Vallejo, 2002).

Además de las problemáticas específicas de cada tipo de depósito sedimentario, en ingeniería geotécnica se enfrentan problemas generales relacionados con la capacidad portante o resistencia del terreno, la deformabilidad de la estructura a cimentar y la perennidad a lo largo del tiempo de las condiciones de resistencia y deformabilidad. Es importante asegurar que el terreno sea capaz de soportar los incrementos de tensiones inducidos por las obras de ingeniería sin

superar los niveles límites de seguridad establecidos, y que la estructura pueda experimentar los movimientos de la cimentación sin repercusiones especiales (Mantilla et al., 1998).

Colombia presenta una gran diversidad de suelos, con características geológicas y geotécnicas que varían ampliamente. Algunos suelos son altamente problemáticos para la construcción de terraplenes aligerados destinados a obras viales, debido a su baja capacidad de soporte, alta plasticidad y presencia de sulfatos. La selección de materiales adecuados es fundamental para garantizar la estabilidad y durabilidad de las vías en el largo plazo, así como la seguridad de los usuarios de las mismas. Por lo tanto, es necesario investigar y aplicar las mejores prácticas en la selección de materiales y técnicas de construcción para enfrentar estos desafíos en condiciones de suelos problemáticos (Mantilla et al., 1998).

Formulación del problema

¿Qué tipos de materiales alternos a los convencionales se emplean en la construcción de terraplenes aligerados para la estabilidad y resistencia del suelo?

Objetivos

A continuación, se muestras los objetivos a desarrollar en la monografía:

Objetivo General

- Elaborar un estado del arte a partir de la revisión bibliográfica sobre los materiales empleados en el proceso constructivo de los terraplenes aligerados.

Objetivos Específicos

- Mostrar las investigaciones que se han desarrollado a la fecha sobre los materiales existentes para el mejoramiento del suelo en terraplenes.
- Recopilar las investigaciones que se han desarrollado a la fecha sobre los materiales que son compatibles con el medio ambiente para el mejoramiento del suelo en terraplenes.
- Determinar los procesos constructivos para terraplenes aligerados.
- Presentar las características de cada uno de los materiales encontrados para laconstrucción de terraplenes aligerados en obras viales.

Justificación

La infraestructura vial es de gran importancia para el desarrollo productivo y eficiente del país, ya que una carretera nueva o su reparación puede contribuir a mejorar la calidad de vida de las personas y el comercio entre ciudades y regiones, generando empleo en la construcción de las mismas. Para garantizar la estabilidad y durabilidad de las vías en el largo plazo, así como la seguridad de los usuarios, es fundamental seleccionar adecuadamente los materiales a utilizar en la construcción de terraplenes aligerados. Estos materiales son utilizados para mejorar la capacidad de soporte y distribución de cargas en el suelo, aumentar la resistencia al corte, controlar la erosión y el asentamiento, y proporcionar una plataforma estable y uniforme para la construcción de la vía. Así mismo, los materiales aligerados pueden reducir el peso de la estructura y minimizar los movimientos sísmicos. Para enfrentar los desafíos en la construcción de terraplenes aligerados en condiciones de suelos problemáticos, es necesario investigar y aplicar las mejores prácticas en la selección de materiales y técnicas de construcción. (Obregón, 2008).

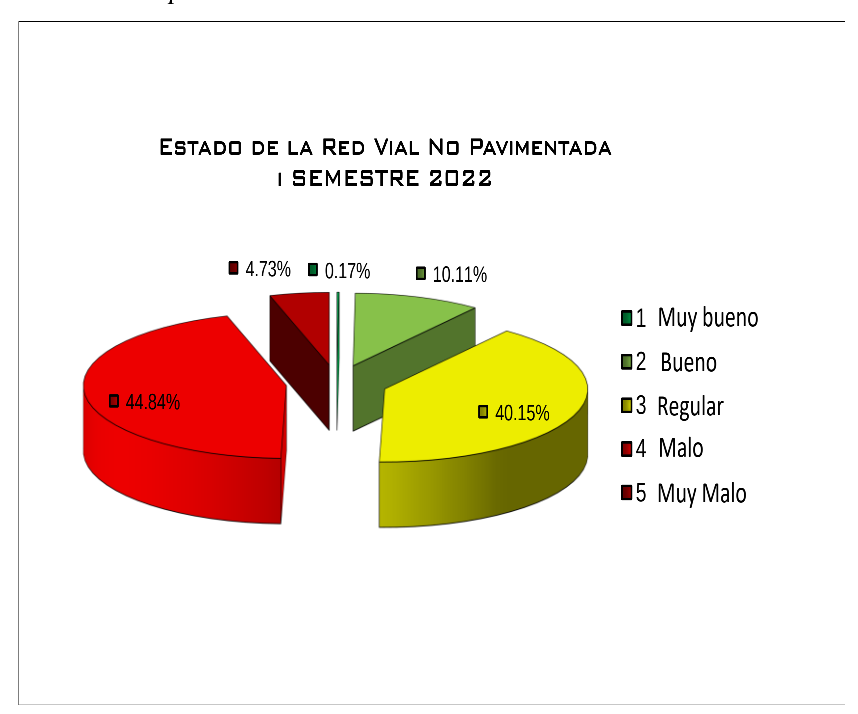
Haciendo un análisis sobre el estado en que encuentra las vías de Colombia y teniendo en cuenta el objetivo de desarrollo sostenible que hace énfasis en la industria, innovación e infraestructura, donde por medio de nuevas obras viales se puede generar nuevos ingresos a nivel nacional e intencional, se facilita el comercio y se hace un uso eficiente y adecuado de los recursos, se evidencia que Colombia no cumple con este objetivo.

Lo anterior se afirma porque si revisamos el reporte de competitividad (The Global Competitiveness Report 2019), realizado por el Foro Económico Mundial, donde Colombia ocupa en el puesto 81 de 141 países en la parte de la infraestructura, esto quiere decir, que nuestro país no cuenta con las mejores obras viales lo que está afectando a la población y sus alrededores (Schwab, 2019).

De igual manera, en el informe nacional de competitividad entre el año 2021 y el año 2022 las vías terciarias representan más del 70 % de la red vial a nivel nacional. No obstante, el 75% se encuentra en mal estado, evidenciando que en departamentos como La Guajira, Vichada, Arauca,

Putumayo y Guaviare presentan una baja densidad vial (Consejo Privado de Competitividad, 2021). Y si revisamos el reporte del estado de las vías, para el 1° primer semestre del 2022, entregado por INVIAS, el panorama, es el siguiente:

Figura 1. Estado de la red vial no pavimentada 2022



Nota: Tomado del instituto nacional de vías. Adoptado de: (Invias, 2022)

Después de un estudio del estado de las vías, con los consorcios que proveen los ejes viales a lo largo y ancho del país, se pudo determinar que el estado de las vías en su gran porcentaje recabe un deterioro prolongado y efectuado ya que los procesos de construcción no son los adecuados evidenciando la inestabilidad de la malla vial en un menor tiempo sin haberse efectuado dichos mantenimientos en los ciclos habituales para este.

De acuerdo con la prescripción del estado de la red vial no pavimentada en el primer semestre de 2022 otorgado por el INVIAS se puede deducir que en un 44.84% de los corredores viales no se encuentran pavimentados debido a que la organización presupuestal no ha sido

ejecutada de manera óptima para la construcción y mantenimiento de manera eficaz, por lo tanto, se observa que en un 4.73% de los ejes viales se encuentran en deterioro prolongado.

Gracias a la evolución en los diferentes sistemas de construcción de ejes viales, a nivel nacional se logra posicionar en un 10.11% en el estado actual de los diferentes corredores en una buena estructuración. Ya que, la implementación de los recursos y materiales se han realizado mediante diferentes estudios y diseños, los cuales han favorecido la preparación y adecuación de la infraestructura vial nacional, es por ello, la importancia de la compactación de suelos, el aumento de la resistencia y disminución de la capacidad de deformación que se obtiene al someter el suelo a técnicas convenientes, que aumentan el peso específico seco y disminuyendo sus vacíos.

Es claro, que esta metodología representa una gran inversión para las autoridades locales y para los ciudadanos, sin embargo, se puede optar por proponer construcciones más amigables con el medio ambiente, sin generar modificaciones químicas y biológicas del suelo, haciendo una correcta construcción del terraplén con los materiales que lo van a formar.

Con la ayuda de información nacional e internacional obtenida de fuentes bibliográficas, sitios web, tesis y artículos científicos, se recopilan y analizan los materiales existentes para la conformación de un terraplén aligerado que brinden mayores beneficios al terraplén y la vía.

En la siguiente monografía se pretende investigar los materiales existentes que son compatibles con el medio ambiente y que se han utilizado en la construcción de terraplenes aligerados en obras de pavimentación, aportando en el desarrollo sostenible, en especial en la industria, innovación e infraestructura.

Capítulo 1: Revisión Inicial.

A lo largo de la historia, los terraplenes han sido utilizados en la construcción de vías de transporte terrestre, tanto en carreteras como en ferrocarriles. En el antiguo Imperio Romano, se utilizaron terraplenes para crear carreteras elevadas y firmes. Durante la Revolución Industrial, los terraplenes se convirtieron en una parte esencial de la construcción de ferrocarriles para crear una base sólida y nivelada sobre la cual se colocarían las vías. Esto permitió el transporte de carga y pasajeros a larga distancia de manera más eficiente. En el siglo XX y en la actualidad, los terraplenes se han utilizado para nivelar el terreno y permitir la construcción de carreteras y autopistas seguras, utilizando diferentes métodos para la construcción de caminos, hechos con piedra y grava para que el suelo fuera más firme, ya que, el suelo es una fuente de nutrientes-minerales de diferentes familias y, en algunos casos, es el principal causante de la descomposición de rocas y organismos. (Anyela & Diego, 2019) (p.10).

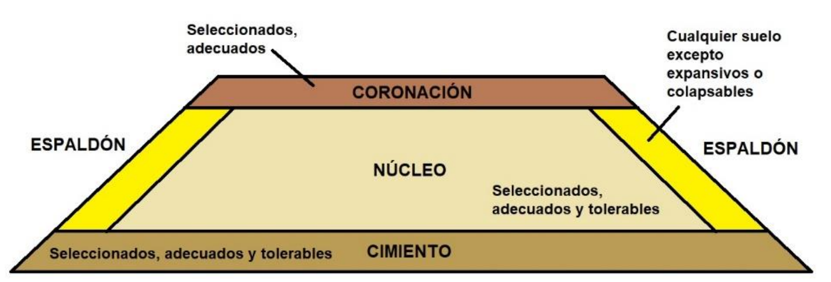
Al paso de los siglos se fueron utilizando diferentes métodos para la construcción de infraestructuras viales que han conectado a lo largo de los años varios departamentos a nivel nacional e internacional teniendo en cuenta las dificultades del suelo, ya que este, es un material suelto que consta de partículas sólidas, con agua y gas que contiene diferentes materiales, como arena, grava, limo y arcilla, existen 4 tipos de suelos, suelo no cohesivo, donde sus partículas no se juntan, otro tipo de suelo es el suelo cohesivo que consiste en partículas muy pequeñas, que produce un efecto eléctrico en la superficie, y finalmente, el suelo orgánico, que es esponjoso y grumoso. A medida que la ingeniería vial avanza, se desarrollan técnicas y materiales más sofisticados para construir terraplenes más estables (Anyela & Diego, 2019) (p.10).

¿Qué es un terraplén y como está formado?

Es la acumulación o amontonamiento de tierra o de material que se ha excavado para rellenar un hueco o para salvar un desnivel, hacer una defensa, o un camino, entre otras posibilidades. Por extensión también se da este nombre a la pendiente que se forma a partir de esa acumulación (Yepes, 2019).

Dentro de la Ingeniería Civil es la tierra con la que se rellena un terreno para levantar el nivel de éste y de esta forma conseguir un plano de apoyo conveniente con el fin de realizar una obra. En el caso de un terraplén de una ruta, se pueden distinguir las siguientes partes:

Figura 2. Partes de un terraplén.



Nota: Materiales que se pueden emplear en un terraplén. Adoptado de: (Yepes, 2019).

- Cimiento: Parte inferior que se encuentra en contacto con la superficie de apoyo. Suele tener un espesor de al menos un metro.
- Espaldón: Parte externa del relleno que de forma ocasional puede ser parte de los taludes del terraplén.
- Núcleo: Relleno que se encuentra entre el cimiento y la coronación.
- Coronación: Capa superior sobre la que se apoya el firme, tiene un espesor mayor de 50 cm. En esa parte se suelen disponer los mejores suelos o sea los que no se resquebrajen, o se asienten.

Para construirlo se utiliza máquinas especializadas que realizan las siguientes tareas:

- Se prepara el suelo retirando lo que haya de terreno vegetal, en ocasiones se debe ejecutar una capa de separación del terraplén artificial con el terreno natural.
- Se extiende, deseca y humedecen las tongadas que son cada una de las capas, mantos o estratos que dan altura al desnivel.
- Se compacta cada tongada.

Capítulo 2: Materiales utilizados para terraplenes aligerados.

De acuerdo con Mrema et al. (2011), una lista de los materiales, desde el más resistente al menos resistente es la siguiente:

Relleno tridimensional

Elementos como las geomallas, los geotextiles, las mallas de alambre, entre otros, son una serie de materiales que se utilizan en el refuerzo del suelo, donde se espera que los terraplenes descansen; es por ello que, en la actualidad, materiales de relleno tridimensional, como en el caso de Geocell y llantas de desecho, demuestran que este tipo de material tiene un desempeño mucho mejor que en el caso de los refuerzos planos, por lo que son alternativas plausibles en lo que respecta a la mejora de materiales para la construcción de terraplenes, pero que a la vez son amigables con el ambiente, ya que se hacen a partir de materiales reutilizables (Mukherjee & Babu, 2023).

Este tipo de refuerzo se basa en la colocación de elementos estructurales tridimensionales, como geotextiles, geomallas y georedes, dentro del cuerpo del terraplén para aumentar su capacidad de carga y estabilidad. Los estudios han demostrado que el uso del refuerzo tridimensional en los terraplenes mejora significativamente su resistencia a la erosión, la licuefacción y la falla por deslizamiento. Además, aumenta la capacidad de carga del terraplén, permitiendo que soporte cargas más pesadas sin experimentar deformaciones excesivas. En algunos casos, el refuerzo tridimensional también puede reducir la cantidad de material de relleno necesario para construir el terraplén, lo que puede resultar en ahorros significativos en costos y tiempo de construcción. En general, los estudios han concluido que el refuerzo tridimensional es una técnica efectiva para mejorar la resistencia y estabilidad de los terraplenes, y puede ser especialmente útil en áreas donde el suelo es débil o las cargas son pesadas (Mukherjee & Babu, 2023).

Un estudio realizado por investigadores de la Universidad de Sichuan en China evaluó el uso de geomallas tridimensionales de polipropileno para reforzar terraplenes. Donde, se encontró

que la presencia de la geomalla mejoró significativamente la estabilidad y la capacidad de carga del terraplén, y también redujo la deformación (Vargas, Moncayo, & Córdova, 2017).

Otro estudio llevado a cabo en Japón investigó el uso de geotextiles tridimensionales de poliéster como refuerzo para terraplenes en suelos blandos. Se observo, que los geotextiles tridimensionales mejoraron la estabilidad del terraplén y redujeron la deformación, en comparación con los terraplenes sin refuerzo (Watanabe, Nakajima, & Fujii, 2020).

Un estudio adicional realizado en la Universidad de California en Berkeley evaluó el uso de refuerzo tridimensional de fibra de vidrio en terraplenes construidos con suelos blandos. Los resultados mostraron que el refuerzo tridimensional mejoró significativamente la estabilidad y la capacidad de carga del terraplén, y también redujo la deformación. En general, estos estudios sugieren que el uso de refuerzo tridimensional puede mejorar significativamente la resistencia y la estabilidad de los terraplenes, especialmente en suelos blandos o en terrenos con baja capacidad de carga, en promedio, se observó un aumento alrededor del 50% en la resistencia al corte del suelo (Busato, y otros, 2016).

Tabla 1. Aportes de la Geomalla.

Parámetros	**Aportes**
Capacidad de carga y estabilidad.	Resistencia a la erosión
Resistencia y estabilidad.	Mejora la licuefacción y la falla por deslizamiento.
Reduce la deformación.	Capacidad de carga.

Nota: Aporte y parámetros estudiados del material.

Hormigón celular ligero (HCL)

Este es uno de los materiales de mayor uso dentro del sector de la construcción, por ello, su uso dentro de la construcción de terraplenes es tan constante, en gran parte por su versatilidad y en sus innumerables ámbitos de aplicación. Es un material blanco que se obtiene por medio de mezcla de agua, cal, arena de sílice y cemento, a cuya mezcla se le incorpora un agente expansor amasado en su fase final de mezcla (Amram, Onaizi, & Fediuk, 2022).

El HCL es un material de construcción que se caracteriza por tener una estructura porosa y una densidad mucho menor que el hormigón convencional. Esto le confiere una serie de propiedades útiles para la construcción de terraplenes, como una buena capacidad de aislamiento térmico y acústico, y una mayor resistencia a la erosión y la compactación (Amram, Onaizi, & Fediuk, 2022).

Según estudios realizados, el HCL se ha utilizado con éxito en la construcción de terraplenes en diversas condiciones geológicas y climáticas. En comparación con otros materiales de relleno, el HCL ha demostrado una mayor resistencia a la erosión y una mayor estabilidad a largo plazo, debido a su capacidad para distribuir uniformemente las cargas aplicadas (Amram, Onaizi, & Fediuk, 2022).

Además, el HCL ha demostrado ser más fácil de manejar y transportar que otros materiales de construcción, lo que puede reducir los costos de construcción y el tiempo necesario para completar un proyecto de terraplén. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la resistencia y estabilidad de los terraplenes construidos con HCL dependen en gran medida de la calidad y la compactación adecuada del material de relleno (Amram, Onaizi, & Fediuk, 2022).

Existen diversos estudios sobre la resistencia de los terraplenes con hormigón celular ligero. Uno de los estudios más destacados se realizó en China en el año 2018 (Li, Yuan, & Gao, 2022), donde se evaluó la viabilidad de utilizar bloques de hormigón celular ligero como material de relleno para terraplenes de carreteras. Los resultados indicaron que el uso de este material puede mejorar significativamente la resistencia y la estabilidad del terraplén, así como reducir los asentamientos diferenciales. Otro estudio realizado en la India en el año 2019 evaluó el comportamiento de los terraplenes rellenados con bloques de hormigón celular ligero bajo diferentes condiciones de carga. Los resultados indicaron que este tipo de material puede soportar cargas importantes sin comprometer la estabilidad del terraplén y mejorando la resistencia al corte del suelo alrededor de 40% (Arradi & Pinori, 2012).

Tabla 2. Aportes del Hormigón Celular Ligero.

Parámetros	Aportes
Menor densidad.	Resistencia a la erosión.
Capacidad de aislamiento térmico y acústico.	Estabilidad.
Soporta cargas y compactación.	Reduce los asentamientos diferenciales.

Nota: Aporte y parámetros estudiados del material.

Ladrillo cerámico

El ladrillo cerámico y sus residuos en el uso de rellenos para terraplenes, son un método de construcción que ha evidenciado como varios de los elementos que se utilizan en el sector de la economía, son de bajo impacto para el medio ambiente si se saben manejar de una manera adecuada. Cuando dichos residuos se combinan con materiales como las arenas eólicas, permiten que se desarrolle un perfeccionamiento en las características de los residuos de ladrillo, dando como resultado una mejora significativa en el ámbito de las construcciones y dando una buena relación con el ambiente (Arias, Matías, Cantero, & López, 2023).

El ladrillo cerámico es un material de construcción ampliamente utilizado en la construcción de terraplenes debido a su disponibilidad y bajo costo en comparación con otros materiales. A continuación, se proporciona información sobre algunas investigaciones relevantes en este tema:

En un estudio realizado por Niedostatkiewicz, Majewski y Baryłka en India (2023), se evaluó la resistencia de los terraplenes construidos con ladrillos cerámicos rotos. Se encontró que la resistencia del terraplén aumentó con la compactación adecuada de los ladrillos rotos y la proporción adecuada de arena y arcilla. También se descubrió que la adición de una capa de refuerzo con geomalla aumentó significativamente la capacidad de carga del terraplén.

En otro estudio realizado por Ekberli y Gülser (2016) en Turquía, se examinó la resistencia a la compresión de los terraplenes construidos con ladrillos cerámicos. Se encontró que la resistencia a la compresión de los terraplenes mejoró significativamente con el aumento del porcentaje de ladrillos cerámicos en la mezcla de suelo y la compactación adecuada.

En un estudio realizado por Baya y Zahrai et al. (2017), en Irán, se evaluó la resistencia de los terraplenes construidos con ladrillos cerámicos rotos y agregados de piedra caliza. Se encontró que la adición de piedra caliza mejoró significativamente la resistencia a la compresión del terraplén. También se descubrió que la adición de refuerzo con geomalla aumentó aún más la resistencia a la compresión. Estos estudios sugieren que los terraplenes construidos con ladrillos cerámicos pueden tener una buena resistencia siempre que se realice una compactación adecuada y se seleccione la proporción correcta de materiales de construcción. Además, la adición de un refuerzo con geomalla puede aumentar significativamente la capacidad de carga del terraplén y mejoró la resistencia al corte del suelo en un 30% en promedio.

Tabla 3. Aportes del Ladrillo Cerámico.

Parámetros	Aportes
Capacidad de carga.	Resistencia a la compresión.
Compactación.	Reduce la erosión.
Resistencia al corte.	Retiene la humedad.

Nota: Aporte y parámetros estudiados del material.

Cal

Se hace uso de este material en suelo expansivo, sobre todo en pavimentos que tienen una difícil adherencia y de muy baja flexibilidad frente a las condiciones del terreno, pero que, debido a su cualidad de rigidez estructural, son especialmente importantes en la construcción de terraplenes. Es por ello, que la cal se presenta como un material de adhesión que puede ayudar a mejorar las falencias de dicho pavimento, y que, en ciertos lugares, como en el caso de la India, ha mejorado significativamente la manera en la que se usa este tipo de pavimento en la construcción de vías (Anaokar & Mhaiskar, 2020).

La cal es un material utilizado en la construcción de terraplenes debido a su capacidad de mejorar la estabilidad, la resistencia, cohesión, reducción de la compresibilidad y el mejoramiento de la capacidad portante del suelo. Además, contribuye al control de la humedad, reduciendo la expansión y contracción del suelo, minimizando el riesgo de fallas en el terraplén. Un estudio realizado en India evaluó la estabilización del suelo con cal en un terraplén, demostrando que la

adición de este material mejoró de manera significativa la resistencia del suelo y la estabilidad del terraplén (Vukićević, Marjanović, Pujević, & Jocković, 2019).

En un estudio realizado en Irlanda evaluó la estabilización de suelos con cal en la construcción de terraplenes en carreteras y también encontró que la adición de cal mejoró la resistencia y la estabilidad del suelo. En general, los estudios han demostrado que la cal puede ser una herramienta eficaz para mejorar la resistencia y estabilidad de los terraplenes (Daly, 2015).

De igual forma, un estudio realizado por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) de Argentina evaluó la estabilización de suelos con cal en la construcción de terraplenes en carreteras. Los resultados mostraron que la incorporación de cal mejoró significativamente la resistencia al corte del suelo, redujo la plasticidad y la expansión del suelo, y aumentó su estabilidad (Fernández, 1997).

Otro estudio realizado en la Universidad de Guadalajara en México evaluó la estabilización de suelos arcillosos con cal y su uso en terraplenes para la construcción de carreteras. Los resultados mostraron que la adición de cal al suelo mejoró su estabilidad y resistencia al corte, así como también redujo la expansión del suelo. Además, un estudio realizado en la Universidad de Granada en España evaluó la influencia de la adición de cal en la resistencia al corte de suelos residuales. Los resultados mostraron que la adición de cal mejoró la resistencia al corte del suelo en un 65% en promedio (Cal & Cárdenas, 2016). Por ello, estos estudios sugieren que el uso de cal en la construcción de terraplenes puede mejorar significativamente la resistencia y estabilidad del suelo, lo que puede resultar en una construcción más duradera y segura (Cal & Cárdenas, 2016).

Tabla 4. Aportes de la Cal.

Parámetros	Aportes
Estabilidad.	Resistencia del suelo.
Compresibilidad.	Capacidad portante.
Humedad.	Disminuye la expansión y contracción del suelo.
Reduce la plasticidad.	Resistencia al corte.

Nota: Aporte y parámetros estudiados del material.

Geomantas de fibra de basalto

Las geomantas de fibra de basalto son un material geo sintético que ha sido empleado en los últimos años en la construcción de terraplenes, especialmente en el uso de una serie de rellenos que por un lado son mucho más amigables con el ambiente, y por otro, tienen una característica importante, su economía al momento de producirse, ya que provienen de fibras naturales que pueden ser halladas en muchos lugares del planeta, por lo que no son un elemento que escasee. Se ha demostrado que su uso a mejorar significativamente la calidad de los terraplenes, y con ello, que se ha encontrado una gran cantidad de usos dentro de la construcción, debido a su adaptabilidad y manejo por parte de todos los colaboradores que hacen parte de proyectos viales (Bieliatynskyi, Krayushkina, Breskich, & Lunyakov, 2021).

Las geomantas de fibra de basalto son un tipo de geosintético utilizado en la construcción de terraplenes y otros proyectos de ingeniería civil para reforzar el suelo y aumentar su capacidad de carga. Existen algunos estudios que han investigado su efectividad en la resistencia de los terraplenes, a continuación, se proporciona información sobre algunas investigaciones relevantes en este tema:

En un estudio desarrollado en China, se evaluó el uso de geomantas de fibra de basalto para mejorar la resistencia de un terraplén de carretera construido en suelos blandos. Los resultados indicaron que el uso de geomantas de fibra de basalto aumentó significativamente la capacidad portante del suelo y redujo el asentamiento del terraplén (Bieliatynskyi, Krayushkina, Breskich, & Lunyakov, 2021).

Otro estudio realizado en Italia, evaluó el uso de geomantas de fibra de basalto para mejorar la estabilidad de un terraplén en un suelo residual de roca. Los resultados indicaron que el uso de geomantas de fibra de basalto mejoró significativamente la capacidad portante del suelo y redujo el riesgo de deslizamientos (Patel, 2019).

En general, estos estudios sugieren que las geomantas de fibra de basalto pueden ser efectivas para mejorar la resistencia de los terraplenes en diferentes tipos de suelo, en promedio, se ha observado un aumento de alrededor del 25% en la resistencia al corte del suelo (Patel, 2019).

Tabla 5. Aportes de la Geomantas.

Parámetros	Aportes
Capacidad de carga.	Capacidad portante.
Resistencia.	Reduce el asentamiento.
Estabilidad.	Reduce el riesgo de deslizamientos.

Nota: Aporte y parámetros estudiados del material.

Arcilla expandida

La Arcilla expandida es obtenida a partir de arcillas naturales especiales mediante un proceso térmico de expansión a 1200 °C. Los granos se caracterizan por una estructura interna celular, ligera y aislante, envuelta por un caparazón compacto y resistente presentando una excelente relación peso/resistencia, por lo que resultan adecuados para una amplia gama de aplicaciones en geotecnia, infraestructuras y construcción (Saride & Sirigiripet, 2008).

La arcilla como núcleo del terraplén reduce consideradamente el peso hasta el 80% y evita parcial o totalmente los gastos de estabilización del terreno de fundación. Gracias a esta técnica de compensación de las cargas (sustitución de un volumen equivalente de arcilla expandida), también es posible construir terraplenes sin aumentar las cargas en el terreno (o aumentándolas muy poco) sin variar el estado de equilibrio tensional original (DeMerchant & Valsangkar, 2022).

Existen varios estudios sobre la resistencia de los terraplenes con arcilla expandida como material de relleno. En general, estos estudios han demostrado que la arcilla expandida tiene un buen desempeño como material de relleno para terraplenes debido a su bajo peso específico y alta capacidad de drenaje (DeMerchant & Valsangkar, 2022).

Por ejemplo, un estudio realizado en Corea del Sur evaluó la resistencia de un terraplén relleno con arcilla expandida durante un período de 4 años. Los resultados indicaron que el

terraplén con arcilla expandida tuvo un buen desempeño en términos de estabilidad y resistencia a la deformación (Fookes, 1997)

La investigación realizada en España, evaluó la utilización de arcilla expandida en un terraplén para la construcción de una carretera. Los resultados demostraron que la arcilla expandida mejoró significativamente la capacidad de carga del terraplén y redujo la deformación (Laterlite, 2015)

En general, se tiene que la arcilla expandida es un material de relleno efectivo para terraplenes en términos de estabilidad y resistencia a la deformación.

Tabla 6. Aportes de la Arcilla Expandida.

Parámetros	Aportes
Bajo peso específico.	Alta capacidad de drenaje.
Estabilidad.	Resistencia a la deformación.
Capacidad de carga del terraplén.	Redujo la deformación.

Nota: Aporte y parámetros estudiados del material.

Escorias de horno cuchara

Este tipo de materiales han sido experimentos llevados a cabo en lugares no precisamente relacionados con la construcción, pero que debido a sus características se han visto envueltos en el uso de este tipo de sectores de la economía. Por ello, muchos de dichos experimentos, se manejan bajo ambientes controlados, que son a la vez variables replicadas que pueden ser utilizadas en casos como las construcciones de vías y demás. El asunto es que se pudo evidenciar, que, en los ensayos de expansión volumétrica, pueden ser aplicables a proyectos relacionados con la ingeniería civil tanto al momento de ser usados en este caso como las escorias y horno cuchara, en circunstancias muy similares a lo que puede ocurrir en la construcción de terraplenes en entornos naturales (Montenegro, Matachala, & Cañizal, 2019).

Los terraplenes con escorias de horno de cuchara, también son conocidas como escorias siderúrgicas. Estas escorias son un subproducto de la producción de acero y su uso en la

construcción de terraplenes ha sido objeto de estudio en los últimos años. Los estudios han demostrado que las escorias de horno de cuchara pueden ser una alternativa sostenible y rentable para la construcción de terraplenes. Se ha comprobado que tienen una buena capacidad de soporte de carga, baja compresibilidad y alta resistencia al corte, lo que las convierte en un material adecuado para la construcción de terraplenes en áreas con suelos de baja calidad. Además, las escorias de horno de cuchara tienen propiedades de drenaje mejoradas en comparación con otros materiales de construcción de terraplenes, lo que las convierte en una buena opción para áreas propensas a inundaciones (Montenegro, Matachala, & Cañizal, 2019).

Un estudio realizado por investigadores de la Universidad de Granada en España evaluó el comportamiento mecánico de terraplenes hechos con escorias de horno de cuchara. Los resultados mostraron que los terraplenes construidos con escorias de horno de cuchara tenían una mayor resistencia y rigidez que los terraplenes construidos con agregados naturales. También se encontró que el uso de escorias de horno de cuchara en los terraplenes podría reducir los costos de construcción y mejorar la sostenibilidad (Najarro-Quintero, Cruz-Crespo, Perdomo-Gonzalez, Ramirez-Tórrez, & Orbea-Jiménez, 2018).

Otro estudio realizado por la Universidad de São Paulo en Brasil evaluó el uso de escorias de horno de cuchara, mostrando que los terraplenes construidos con este material tenían una mayor capacidad de carga y una mayor estabilidad que los terraplenes construidos con materiales convencionales. También se encontró que el uso de escorias de horno de cuchara podría reducir los costos de construcción y mejorar la durabilidad de los terraplenes (Patel, 2019).

Tabla 7. Aportes de la Escoria de Horno Cuchara.

Parámetros	Aportes
Capacidad de carga.	Baja compresibilidad.
Compactación.	Resistencia al corte.
Estabilidad.	Rigidez.

Nota: Aporte y parámetros estudiados del material.

Áridos ligeros naturales

Existen una serie de agregados de piedra pómez que provienen del enfriamiento rápido de la lava, cuando esta sale de la capa terrestre, esto se realiza mediante la molienda de bloques de piedra pómez mucho más grandes, de los culés, se extraen cada uno de los materiales que son utilizados en los rellenos de los terraplenes, y que se pueden caracterizar por ser reconocidos como áridos ligeros naturales. Debido a su composición casi que, sin ningún cambio realizado por procesos industriales hechos por el hombre, este tipo de materiales son unos de los de más bajo impacto al ambiente que se pueden encontrar dentro del sector de la construcción (Marradi, Pinori, & Betti, 2012).

Los áridos ligeros naturales son materiales de construcción comunes en la construcción de terraplenes debido a su bajo peso y capacidad de aislamiento térmico. Sin embargo, la resistencia de los terraplenes construidos con áridos ligeros naturales depende de varios factores, como la densidad del material, la compactación adecuada y la estabilidad a largo plazo. Se han realizado varios estudios sobre la resistencia de los terraplenes con áridos ligeros naturales. Estos estudios han demostrado que la densidad del material es un factor clave en la resistencia del terraplén. Cuanto mayor sea la densidad del material, mayor será su capacidad para soportar cargas y deformaciones. Además, la compactación adecuada del material es esencial para asegurar la estabilidad y resistencia del terraplén. La falta de compactación adecuada puede resultar en asentamientos diferenciales, lo que puede llevar a la falla del terraplén (Marradi, Pinori, & Betti, 2012).

En cuanto a la estabilidad a largo plazo, se han llevado a cabo estudios para evaluar la resistencia a la erosión y la licuefacción de los terraplenes construidos con áridos ligeros naturales. Estos estudios han demostrado que la erosión y la licuefacción pueden ser problemas significativos para los terraplenes construidos con estos materiales y que se requieren medidas de protección adecuadas para garantizar su estabilidad a largo plazo (Marradi, Pinori, & Betti, 2012).

La investigación realizada en España (Arias, Matías, Cantero, & López, 2023), evaluó la capacidad portante de los terraplenes construidos con áridos ligeros naturales de diferentes regiones geográficas. Los resultados mostraron que la resistencia de los terraplenes dependía en gran medida del tipo y la calidad del árido ligero utilizado, así como de la compactación adecuada.

El estudio, realizado en Irlanda, evaluó la estabilidad a largo plazo de los terraplenes construidos con áridos ligeros naturales en condiciones climáticas extremas. Los resultados indicaron que la capacidad de estos terraplenes para resistir cargas y deformaciones a largo plazo dependía en gran medida de la calidad y la compactación adecuada del material de relleno (Daly, 2015).

Aunque hay limitada investigación disponible en este tema, se considera que los áridos ligeros naturales son una opción prometedora para la construcción de terraplenes debido a su bajo peso y su capacidad para reducir la carga sobre el suelo subyacente (Daly, 2015).

Tabla 8. Aportes de Áridos Ligeros Naturales.

Parámetros	Aportes
Densidad.	Bajo peso.
Compactación.	Capacidad de aislamiento térmico
Estabilidad.	Resistencia.
Resistencia a la erosión y la licuefacción.	Soporta cargas y deformaciones.

Nota: Aporte y parámetros estudiados del material.

Geo espuma

Este tipo de materiales, que son amigables con el ambiente, se han hecho importantes en la construcción de elementos relacionados con los terraplenes para la construcción de vías. En este caso, el uso de los mismos con respecto a terraplenes ferroviarios, han sido un elemento mucho más importante en la reutilización de materiales, como el caso de los desechos agregados a otros elementos como el geotextil o las geo espumas, que por medio de procesos químicos y mezclas de diversa índole, han ayudado a la construcción de mejoras significativas en la manera en cómo se construyen estructuras de este tipo, haciendo uso de nuevos materiales para estos terraplenes de alto desempeño (El-kady, Abdelhalim, & Ahmed, 2023).

La geoespuma es un material ligero y de baja densidad utilizado en la construcción de terraplenes para mejorar su capacidad de carga, reducir la deformación y mejorar su estabilidad. Se ha investigado ampliamente el uso de la geoespuma en la construcción de terraplenes y su resistencia en diferentes situaciones. Según los estudios, la geoespuma tiene una capacidad de carga significativamente mayor que los materiales de relleno convencionales, como la arcilla y la arena. La geoespuma es capaz de soportar cargas verticales y laterales, lo que la hace ideal para su uso en la construcción de terraplenes. Además, la geoespuma tiene una alta resistencia a la compresión, lo que significa que puede soportar cargas sin deformarse permanentemente y un aumento de alrededor del 40% en la resistencia al corte del suelo (El-kady, Abdelhalim, & Ahmed, 2023).

Los estudios también han demostrado que la geoespuma es efectiva para reducir la deformación del terraplén y mejorar su estabilidad en situaciones como terremotos, vibraciones y deslizamientos de tierra. La geoespuma puede absorber y distribuir las fuerzas de carga de manera uniforme, lo que minimiza la deformación y el asentamiento del terraplén. Además, es un material de construcción sostenible, ya que se produce a partir de materiales reciclados y se puede reutilizar después de su uso, esto puede reducir la cantidad de materiales de construcción tradicionales utilizados en los terraplenes y reducir los costos de construcción y mantenimiento (Gaitán, 2014).

La Universidad Politécnica de Madrid investigó la resistencia de un terraplén reforzado con geoespuma bajo cargas de tráfico pesado. Los resultados del estudio mostraron que la geoespuma mejoró significativamente la resistencia del terraplén y redujo los asentamientos diferenciales. Otro estudio realizado en la Universidad de Texas examinó la estabilidad de un terraplén reforzado con geoespuma en una zona sísmica. Los resultados del estudio indicaron que la geoespuma redujo el potencial de falla del terraplén debido a la actividad sísmica (Gaitán, 2014).

Tabla 9. Aportes de la Geoespuma.

Parámetros	Aportes
Deformación.	Capacidad de carga.
Estabilidad.	Soporta cargas verticales y laterales.
Resistencia a la compresión.	Reduce los asentamientos diferenciales.

Nota: Aporte y parámetros estudiados del material.

Biocarbón

Es un material microbiano que tiene la característica de no ser degradable, pero a la vez es respetuoso con el ambiente, debido a su porosidad, junto con una de sus características primordiales, que es un material de gran superficie, lo que le permite contener una amplia gama de nutrientes y una superficie que se encuentra cargada de grupos químicos funcionales, esto le permite tener una mayor capacidad de retención de agua, lo que genera una mejora en el crecimiento de la vegetación; sin embargo, a la vez, dicho uso puede ser empleado en terraplenes, que permiten una estructura rígida cono porosidad específica para el drene de agua en dichas construcciones (Hussain & Ravi, 2020).

El biocarbón es un material derivado del pirólisis de materia orgánica, como residuos agrícolas o forestales, y se utiliza en aplicaciones como sustrato de cultivo y como enmienda del suelo. Sin embargo, su uso en terraplenes es relativamente nuevo y aún no hay muchos estudios sobre su resistencia específica en esta aplicación (Hussain & Ravi, 2020).

La investigación realizada en la india, publicada en la revista Construction and Building Materials en 2020 evaluó la resistencia a la compresión de terraplenes construidos con biocarbón y su comparación con terraplenes construidos con materiales de relleno convencionales como arena y grava. Los resultados mostraron que los terraplenes construidos con biocarbón presentaron una resistencia a la compresión menor en comparación con los terraplenes de arena y grava, pero la diferencia no fue significativa. El estudio también señaló que el uso de biocarbón en terraplenes podría ayudar a reducir las emisiones de carbono y a promover la sostenibilidad (Swamy & Vamshi Krishna, 2019).

Tabla 10. Aportes del Biocarbón.

Parámetros	Aportes
Resistencia a la compresión.	Retención de agua.
Reduce las emisiones de carbono.	Sostenibilidad.

Nota: Aporte y parámetros estudiados del material.

Cenizas volantes de carbón

Las cenizas volantes de carbón son un subproducto de la combustión del carbón en las centrales térmicas que pueden ser utilizadas en la construcción de terraplenes y otras obras de ingeniería civil. Estas cenizas tienen propiedades que pueden mejorar la resistencia y estabilidad de los suelos, y su uso puede ser beneficioso desde el punto de vista ambiental y económico al evitar la disposición de residuos en vertederos (Pardo De Santayana et al.,2020).

Los estudios con las cenizas volantes de carbón son investigaciones entre los años 80 y 90 en CEDEX (2023), en esta búsqueda se observan las características geotécnicas de materiales naturales y suelos artificiales. Con base en los resultados obtenidos, las cenizas volantes pueden ser valiosas como material de terraplén; debido a la compactación de este material de relleno es resistente, con capacidad portante y deformabilidad, volviéndose un terraplén ligero (PardodeSantayana, Tardío, & Aceituno, 2020).

Cada uno de los problemas que se pueden encontrar dentro del medio ambiente en lo que respecta al uso de ciertos materiales en los terraplenes, tienen que ver con la forma de extracción de dichos materiales. Para el caso de los materiales que provienen del carbón, por la manera en la que se extraen de las minas, este genera una serie de cenizas que con el paso del tiempo son realmente preocupantes en lo que respecta al ambiente de las zonas aledañas donde se lleva a cabo la extracción, por ello, es un elemento que debe ser considerado seriamente en la manera en la como se produce la extracción del mismo (Curpen, Teutsch, Kovler, & Spatari, 2023).

Según la investigación publicada en la revista Construction and Building Materials, el uso de cenizas volantes de carbón en la construcción de terraplenes puede mejorar su resistencia y estabilidad. El estudio encontró que la adición de cenizas volantes de carbón al suelo de los terraplenes puede aumentar la resistencia a la compresión y la resistencia al corte del suelo alrededor del 20%-30%, así como mejorar su capacidad de drenaje (Echezona & Adamu, 2022).

Por otro lado, en la publicación de la revista Journal of Materials in Civil Engineering se encontró que las cenizas volantes de carbón pueden mejorar la resistencia a la erosión y la estabilidad de los terraplenes, especialmente en condiciones de alta humedad. Sin embargo, el estudio también señala que el uso de cenizas volantes de carbón puede afectar la permeabilidad y la capacidad de asentamiento del suelo, por lo que es importante realizar estudios específicos para evaluar su impacto en cada caso (Deepak, Rohini, Harini, & Beulah, 2021).

El uso de cenizas volantes de carbón en la construcción de terraplenes puede ser beneficioso, pero es importante realizar estudios específicos para evaluar su impacto en cada caso y asegurarse de que se utilicen las cantidades adecuadas para evitar posibles efectos negativos (Deepak, Rohini, Harini, & Beulah, 2021).

Tabla 11. Aportes de las Cenizas Volantes de Carbón.

Parámetros	Aportes	Afecta
Resistencia al corte y resistencia a la compresión.	Capacidad portante y deformidad.	Permeabilidad.
Capacidad de drenaje.	Estabilidad y resistencia a la erosión.	Capacidad de asentamiento del suelo.

Nota: Aporte y parámetros estudiados del material.

Vidrio triturado

Este tipo de materiales se han utilizado en los últimos años en otro tipo de elementos de reutilización del vidrio, que permite no solo la reutilización de dicho material, sino a la vez en la reducción de gases de efecto invernadero, así como en el uso de nuevos recursos para volver a hacer uso de este tipo de materiales. Si bien dentro de la construcción no ha sido utilizado de manera muy general, si bien es cierto que en acciones como, el uso de rellenos para terraplenes, ha sido una opción bastante útil en los últimos años, que economiza recursos de todo tipo, y a la vez, genera una serie de impactos ambientales positivos, pues se hace reúso del material, y no la producción de nuevo para la construcción (Mohajerani, Bakaric, & Jeffrey-Bailey, 2017).

Figura 3. Vidrio Triturado.



Nota: Aplicaciones prácticas de reciclaje de residuos de vidrio triturado en materiales de construcción. Adoptado de: (Mohajerani, y otros, 2017).

Estos estudios han investigado el uso de residuos de vidrio como material de relleno en los terraplenes y su efecto en la resistencia y estabilidad del terraplén. Uno de los principales beneficios del uso de residuos de vidrio como material de relleno es su alta resistencia a la compresión. Además, el vidrio triturado puede ser utilizado en combinación con otros materiales de relleno para mejorar la estabilidad del terraplén. Los estudios han demostrado que el uso de residuos de vidrio en los terraplenes puede reducir la cantidad de material de relleno necesario y mejorar la capacidad de carga del terraplén. Sin embargo, también se han identificado algunos desafíos en el uso de residuos de vidrio, como su capacidad para absorber agua y la necesidad de asegurar una adecuada compactación del material *(*Mohajerani, y otros, 2017*)*.

Una de las investigaciones realizadas fue llevada a cabo por la Universidad de Córdoba en España, en el que se evaluó la resistencia a la compresión de mezclas de suelos con diferentes porcentajes de residuos de vidrio triturado como relleno en la construcción de terraplenes. Los resultados indicaron que la adición de residuos de vidrio en el relleno del terraplén mejoró su resistencia a la compresión (Agrela, Barbudo, & Ramírez, 2012).

Sin embargo, la Universidad de Ottawa en Canadá investigó la resistencia al corte de terraplenes reforzados con geotextiles y rellenos de mezclas de suelos con residuos de vidrio

triturado. Los resultados indicaron que la adición de residuos de vidrio mejoró significativamente la resistencia al corte de los terraplenes reforzados con geotextiles (Li, Yuan, & Gao, 2022).

Estos estudios demuestran que el reciclaje de residuos de vidrio triturado puede ser una alternativa viable y sostenible en la construcción de terraplenes, mejorando su resistencia y reduciendo la cantidad de residuos enviados a vertederos *(*Mohajerani, y otros, 2017*)*.

Tabla 12. Aportes de Vidrio Triturado.

Parámetros	Aportes
Absorbe agua.	Estabilidad.
Resistencia a la compresión.	Resistencia al corte.
Compactación.	Capacidad de carga.

Nota: Aporte y parámetros estudiados del material.

Fibra de coco

La fibra de coco es un material biodegradable y renovable que se utiliza en la construcción de terraplenes y taludes como un reemplazo de los materiales tradicionales. La fibra de coco se utiliza como un refuerzo en la tierra, lo que mejora la resistencia y estabilidad del terraplén. Algunos estudios han demostrado que la fibra de coco mejora la resistencia al corte y la resistencia a la compresión de los terraplenes. Además, la fibra de coco tiene propiedades hidráulicas que ayudan a retener la humedad en el suelo, lo que reduce la erosión y mejora la estabilidad del terraplén (Ting, 2015).

Por ejemplo, la investigación realizada en la India evaluó el uso de la fibra de coco en la construcción de terraplenes en carreteras. Los resultados mostraron que el uso de la fibra de coco mejoró la resistencia al corte y la resistencia a la compresión del suelo, lo que a su vez mejoró la estabilidad y la capacidad de carga del terraplén. Otro estudio realizado en Malasia investigó el uso de la fibra de coco como material de refuerzo en terraplenes de arcilla. Los resultados mostraron que la adición de fibra de coco aumentó la resistencia al corte del suelo alrededor de un 20%-30% y mejoró la estabilidad del terraplén, especialmente cuando se utilizó una proporción adecuada de fibra de coco (Ting, 2015).

En general, los estudios sugieren que la fibra de coco puede ser una alternativa viable y sostenible a los materiales tradicionales utilizados en la construcción de terraplenes. "Use of Coconut Fibers in Road Construction" (Uso de fibras de coco en la construcción de carreteras) es un estudio realizado por la Universidad de Puerto Rico en 2010 que evaluó el uso de fibras de coco en la construcción de carreteras y terraplenes. Los resultados mostraron que la adición de fibras de coco mejoró significativamente la resistencia al corte del suelo utilizado en el terraplén (Munirwan et al., 2020)

"Utilización de fibras de coco como material de refuerzo en terraplenes" es un estudio realizado por la Universidad Piloto de Colombia en 2019 que evaluó la resistencia de los terraplenes reforzados con fibras de coco. Los resultados indicaron que la adición de fibras de coco mejoró significativamente la resistencia a la compresión y el corte del terraplén, y también mejoró su estabilidad (Cabezas & Serrato, 2019)

"Coconut Fiber Reinforcement in Road Construction" (Refuerzo de fibras de coco en la construcción de carreteras) es un estudio realizado por la Universidad de Florida en 2018 que evaluó la resistencia de los terraplenes reforzados con fibras de coco en comparación con otros materiales de refuerzo comunes. Los resultados mostraron que la adición de fibras de coco mejoró significativamente la resistencia al corte y la compresión del suelo utilizado en el terraplén, y también mejoró la estabilidad del terraplén en comparación con otros materiales de refuerzo (Ting, 2015).

Tabla 13. Aportes de Fibra de Coco.

Parámetros	**Aportes**
Capacidad de carga.	Mejora la resistencia al corte y resistencia a la comprensión.
Reducción de humedad.	Reduce la erosión y mejora la estabilidad.

Nota: Aporte y parámetros estudiados del material.

Lutita Carbonácea

Este tipo de material se caracteriza por ser una roca blanda típica del sudeste asiático, que en el caso de encontrarse en un relleno de terraplén es algo deficiente debido a que se desintegra de manera muy sencilla, ya que tiene poca resistencia y una enorme deformabilidad. Por ello, se recomienda que no se construya ningún tipo de carretera, pero dado el caso de que se deba realizar, es indispensable que se haga uso del método de reemplazo para que se traten de esta forma dichos terraplenes (Mishra, Hackley, Jubb, & Sanders, 2022).

Figura 4. Lutita Carbonácea.



Nota: Comportamiento mecánico de lutita carbonácea desintegrada bajotensión y secado/humectación cíclica. Adoptado de: (Zeng, Yu, Liu, & Gao, 2021).

La Lutita Carbonácea es una roca sedimentaria rica en carbono que se utiliza a menudo como material de relleno en la construcción de terraplenes. Un estudio realizado por el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Illinois evaluó la capacidad de este material para soportar cargas y deformaciones. Los resultados indicaron que la Lutita Carbonácea es capaz de soportar cargas significativas y tiene una resistencia a la deformación comparable a la de otros materiales de relleno utilizados en la construcción de terraplenes. Otra investigación realizada por la Universidad de Ciencia y Tecnología de China examinó la estabilidad de los terraplenes construidos en condiciones de terremoto. Los resultados mostraron que los terraplenes hechos a base de este material son capaces de soportar cargas dinámicas y tienen una buena resistencia a la licuefacción (Mishra, Hackley, Jubb, & Sanders, 2022).

Tabla 14. Aportes de la Lutita Carbonácea.

Parámetros	Aportes
Resistencia.	Desintegración de manera muy sencilla.
Soporta cargas dinámicas.	Enorme deformabilidad.
Sopor cargas significativas.	Resistencia a la licuefacción.

Nota: Aporte y parámetros estudiados del material.

Arcilla

Este tipo de terraplenes tienen la posibilidad de ser amistosos con el ambiente, pero presentan un problema de humedad considerable que ha sido estudiado por medio de diferentes investigaciones, las cuales han llegado a la conclusión que con el manejo adecuado de la arcilla, por medio de la utilización de otros materiales compuestos con esta, se puede llegar a mejorar esta deficiencia que se presenta, ya que se ha visto que los terraplenes que se han construido con dichos materiales tienen una resistividad bastante elevada en comparación con otro tipo de materiales, que a la vez son mucho más dañinos para el ambiente y los seres humanos (Mavroulidou, Zhang, Gunn, & Cabarkapa, 2013).

La arcilla es un tipo de suelo que se utiliza frecuentemente en la construcción de terraplenes debido a su alta capacidad de soporte y su capacidad para resistir la erosión. Los estudios realizados sobre la resistencia de los terraplenes con arcilla se han centrado en varias áreas, incluyendo la evaluación de la capacidad de carga y la estabilidad de los terraplenes de arcilla bajo diferentes condiciones, la evaluación de los efectos del contenido de humedad y la compactación en la resistencia de los terraplenes de arcilla, y el estudio de los efectos de la arcilla en la respuesta sísmica de los terraplenes (Mavroulidou, Zhang, Gunn, & Cabarkapa, 2013).

Por ejemplo, un estudio realizado por T. A. Newson y J. F. Thompson en 1977 evaluó la capacidad de carga de los terraplenes de arcilla en Ontario, Canadá. Según, los resultados indicaron que los terraplenes de arcilla con una altura de 4,5 metros tenían una capacidad de carga máxima de aproximadamente 250 kPa. En otra investigación realizada por M. F. Randolph y R. J. Gourvenec en 2003, se evaluaron los efectos del contenido de humedad y la compactación en la resistencia de los terraplenes de arcilla en Singapur. Se evidenció, que la resistencia del suelo

incrementaba con el aumento de la compactación y disminuía con el incremento del contenido de humedad y se observó, un aumento alrededor del 30-40% en la resistencia al corte del suelo (Soltani, Deng, Taheri, & O'Kelly, 2022).

De este modo, los estudios sobre la resistencia de los terraplenes con arcilla han demostrado que este tipo de suelo es un material adecuado para la construcción de terraplenes y que su resistencia y capacidad de carga pueden ser mejoradas mediante la compactación y el control del contenido de humedad (Mavroulidou, Zhang, Gunn, & Cabarkapa, 2013).

Tabla 15. Aportes de la Arcilla.

Parámetros	Aportes
Capacidad de soporte.	Capacidad para resistir la erosión.
Humedad.	Capacidad de carga.
Estabilidad.	Compactación.

Nota: Aporte y parámetros estudiados del material.

Poliestireno expandido (Relleno aligerado).

El relleno aligerado que es un material en forma de bloques rectangulares hechos a base de Poliestireno Expandido, este es un material que brinda estabilidad y no se descompone, debido a sus características es utilizado en suelos débiles y aparte cuenta con un diámetro de 0,25 mm a 2 mm (Andía, 2022).

El poliestireno expandido es un material de baja densidad, tiene resistencia a la tracción y a la flexión, es un material que absorbe una pequeña cantidad de humedad, se dilata y se contrae con las cambios de temperatura, a bajas temperaturas no hay limitaciones, pero, cuándo está a temperaturas superiores a los 100 °C se puede ver afectado, es recomendable mantener la temperatura del material por debajo de los 80°C, tiene deformaciones que varían entre 0,05 y 0,07 mm por metro y grado centígrado según el coeficiente de dilatación térmica (Rizo & Vergel, 2020).

Figura 5. Uso de bloques de poli estireno.



Nota: Uso del elemento de poli estireno expandido como material alternativo en la construcción de terraplenes dentro de la geotecnia vial. Adoptado de: (*Rizo & Vergel, 2020).*

Existen varios estudios sobre la resistencia de los terraplenes con poliestireno expandido (EPS, por sus siglas en inglés). Un estudio realizado en Italia evaluó la estabilidad de un terraplén de 12 metros de altura y 400 metros de longitud construido con EPS. Los resultados indicaron que el uso de EPS mejoró la estabilidad del terraplén y redujo la cantidad de material de relleno necesario. También se observó que el uso de EPS no afectó negativamente la capacidad de soporte de carga del terraplén (Rizo & Vergel, 2020).

Otro estudio realizado en España evaluó la resistencia al corte de un terraplén construido con EPS y comparó los resultados con un terraplén convencional construido con grava y arena. Los resultados indicaron que el terraplén con EPS presentó una mayor resistencia al corte, lo que sugiere que el EPS puede ser una alternativa viable y económica a los materiales de relleno convencionales (Sebastián et al., n.d.).

Un tercer estudio realizado en México evaluó el uso de EPS como relleno en un terraplén para un camino rural. Los resultados indicaron que el EPS mejoró la estabilidad del terraplén y redujo la cantidad de material de relleno necesario. También se observó que el uso de EPS redujo el impacto ambiental de la construcción del terraplén (Hernández, 2020).

De este modo, los estudios sugieren que el uso de EPS puede ser una alternativa efectiva y económica para la construcción de terraplenes, pero es importante tener en cuenta las condiciones

específicas del sitio y las características del terreno antes de tomar una decisión (Sebastián et al., n.d.).

Tabla 16. Aportes del Poliestireno Expandido.

Parámetros	Aportes
Baja densidad.	Resistencia a la tracción y a la flexión.
Se dilata y se contrae con los cambios de temperatura.	Absorbe la humedad.
Estabilidad.	Capacidad de soporte de carga.
Resistencia al corte.	Resistencia a la compresión.
Capacidad de drenaje.	Bajo impacto ambiental.

Nota: Aporte y parámetros estudiados del material.

Estériles negros

Son residuos sólidos resultantes de la explotación minera del carbón. Estos residuos son utilizados en la construcción de terraplenes y obras civiles, ya que tienen propiedades de estabilidad y resistencia mecánica.

Uno de los principales estudios al respecto fue realizado por la Universidad Nacional de Colombia, que evaluó el comportamiento geotécnico de los estériles negros como material de relleno en la construcción de terraplenes en la región de La Guajira, Colombia. Los resultados indicaron que los estériles negros son aptos para ser utilizados en la construcción de terraplenes siempre y cuando se realice una adecuada selección y clasificación del material, así como una compactación adecuada y un monitoreo constante de su comportamiento (Rizo & Vergel, 2020).

Otros estudios también han evaluado la resistencia de los terraplenes al uso de estériles negros en distintas regiones del mundo, como en Australia y Estados Unidos. En general, los resultados indican que los estériles negros pueden ser utilizados en la construcción de terraplenes y obras civiles, siempre y cuando se realice una adecuada selección, clasificación y compactación del material y se realice un monitoreo constante de su comportamiento a lo largo del tiempo (CEDEX, 2023). Un estudio realizado en España evaluó la estabilidad de un terraplén construido con estériles negros de carbón y encontró que la presencia de los estériles no afectó

significativamente la resistencia y estabilidad del terraplén. Asimismo, un estudio en Australia encontró que los estériles negros de carbón mezclados con materiales granulares pueden ser utilizados como relleno para la construcción de terraplenes, siempre y cuando se tomen en cuenta ciertas consideraciones, como la compactación adecuada y la evaluación de la permeabilidad (FEDER, 2013)

Se puede decir que la utilización de estériles negros en la construcción de terraplenes puede ser viable, siempre y cuando se realicen estudios específicos y se tomen en cuenta las características del terreno y los materiales utilizados en la construcción (CEDEX, 2023).

Tabla 17. Aportes de Estériles Negros.

Parámetros	Consideraciones
Estabilidad.	Compactación y permeabilidad.
Resistencia mecánica.	Características del terreno.

Nota: Aporte y parámetros estudiados del material.

Estériles rojos

El uso de estériles rojos puede tener impactos negativos en la resistencia del terraplén debido a su bajo contenido de arcilla y alta porosidad, existiendo varias investigaciones que han evaluado la resistencia de los terraplenes construidos con este material. En general, se ha encontrado que los estériles rojos pueden ser utilizados en la construcción de terraplenes si se toman medidas adecuadas para mejorar su resistencia, estas medidas pueden incluir la mezcla de este material con otros materiales como arcilla y arena, con una compactación adecuada y la implementación de medidas de drenaje para evitar la acumulación de agua en el terraplén (Arias, Matías, Cantero, & López, 2023).

Sin embargo, también se ha encontrado que los terraplenes construidos con estériles rojos pueden tener una vida útil más corta y pueden requerir un mantenimiento más frecuente que los terraplenes construidos con otros materiales. Por lo tanto, se recomienda que se realicen evaluaciones específicas del sitio antes de utilizar estériles rojos en la construcción de un terraplén

y que se tomen medidas adecuadas para garantizar la estabilidad a largo plazo del terraplén (Arias, Matías, Cantero, & López, 2023).

Un estudio realizado en Australia evaluó el uso de estériles rojos en la construcción de terraplenes para una carretera. Se encontró que los estériles rojos podrían utilizarse con éxito para la construcción de terraplenes, pero que era importante tener en cuenta ciertas consideraciones, como la compactación adecuada del material y el control de la humedad durante la construcción. Además, se recomendó que se realicen pruebas de laboratorio para determinar las propiedades físicas del estéril rojo y su comportamiento bajo diferentes condiciones (CEDEX, 2023).

Tabla 18. Aportes de Estériles Rojos.

Parámetros	Consideraciones
Alta porosidad.	Compactación.
Determinar las propiedades físicas.	Humedad.

Nota: Aporte y parámetros estudiados del material.

Residuos reciclados de construcción y de demolición

Como se ha mencionado en otro de los apartados hasta el momento analizados, este tipo de materiales son un buen manejo de los residuos de otros procesos de construcción, sin embargo no tienen la capacidad para mejorar la estructura, y solo pueden ser usados en rellenos, y en la medida misma en que las características del terreno permitan en cierta medida que se puedan emplear, de lo contrario es recomendable que se haga uso tanto de otro método, como de otros materiales de construcción (Li, Yuan, & Gao, 2022).

Los residuos reciclados de construcción y demolición (RCD) son materiales de construcción generados a partir de la demolición, renovación o construcción de edificios, puentes, carreteras, etc. Estos residuos son procesados y clasificados para su uso como agregados en la construcción. Un estudio realizado en España evaluó la resistencia de terraplenes construidos con RCD como agregado y comparó su comportamiento con terraplenes construidos con agregados convencionales. Los resultados mostraron que los terraplenes construidos con RCD presentaron una resistencia adecuada y una capacidad portante similar a la de los terraplenes construidos con

agregados convencionales. Además, los terraplenes con RCD presentaron una mayor deformabilidad, lo que los hace más adecuados para su uso en terrenos con una elevada variabilidad de carga (Ekberli & Gülser, 2016).

Otro estudio realizado en Brasil investigó la posibilidad de utilizar RCD como relleno de terraplenes en carreteras. Los resultados mostraron que los terraplenes construidos con RCD presentaron una resistencia mecánica adecuada y una buena capacidad de soporte de carga. En general, se ha encontrado que el uso de RCD como agregado en la construcción de terraplenes puede ser una alternativa viable y sostenible, ya que reduce la cantidad de residuos que van a los vertederos y disminuye la necesidad de extracción de materiales naturales. Sin embargo, es importante realizar estudios específicos en cada caso para evaluar la idoneidad del uso de RCD y su comportamiento en función de las condiciones geotécnicas y ambientales locales (Busato, y otros, 2016).

Tabla 19. Aportes de los RCD.

Parámetros	Aportes
Resistencia.	Variabilidad de carga.
Capacidad portante.	Deformabilidad.
Resistencia mecánica.	Capacidad de soporte de carga.

Nota: Aporte y parámetros estudiados del material.

Arenas eólicas

Este tipo de material, que tiene que ver con las arenas que se pueden extraer de sitios desérticos, puede ser utilizado en la construcción de terraplenes sólidos, por medio de la estabilización con cemento de Portland. Esto da paso a la aplicación de una serie de materiales combinados entre arena eólicas junto con cemento, que pueden ser usados en las vías ferroviarias, o en aplicaciones variables (Baya & Zahrai, 2017).

La arena eólica es un tipo de arena formada por la erosión de las rocas debido a la acción del viento. Este tipo de arena suele ser más redondeada y uniforme que la arena de origen fluvial o marino. Un estudio realizado en Brasil investigó la utilización de arena eólica como material de

relleno para la construcción de terraplenes. Los resultados mostraron que la arena eólica puede ser utilizada como material de relleno para terraplenes siempre y cuando se realice una compactación adecuada y se mantenga la humedad óptima del suelo. También se observó que la arena eólica presenta una buena resistencia al corte y una baja permeabilidad (Bieliatynskyi, Krayushkina, Breskich, & Lunyakov, 2021).

Otro estudio realizado en Perú evaluó la utilización de arena eólica en la construcción de terraplenes. Los resultados indicaron que la arena eólica es un material de relleno viable y efectivo para la construcción de terraplenes de baja altura en zonas de inundación. En este caso, los estudios indican que la arena eólica puede ser utilizada como material de relleno en la construcción de terraplenes, siempre y cuando se realice una adecuada compactación y se mantenga la humedad óptima del suelo. Sin embargo, es importante considerar que la resistencia y estabilidad del terraplén también dependerá de otros factores como la calidad del suelo y las condiciones ambientales y de carga a las que estará sometido (Castro & Guzmán, 2010).

Un estudio en India evaluó la estabilidad y la resistencia al corte de terraplenes con relleno de arena eólica y concluyó que estos terraplenes tenían una buena capacidad de carga y una alta resistencia al corte. Otro estudio en China investigó la utilización de arena eólica en la construcción de un terraplén de alta velocidad y encontró que la arena eólica tenía un buen rendimiento en términos de estabilidad y resistencia al agua. De esta forma, la utilización de arena eólica en terraplenes parece prometedora debido a su baja densidad, alta permeabilidad y buen drenaje. Sin embargo, se necesitan más investigaciones para determinar su capacidad de carga a largo plazo, su estabilidad frente a los fenómenos naturales y su resistencia a la erosión y la sedimentación.

Tabla 20. Aportes de Arenas Eólicas.

Parámetros	Aportes
Compactación.	Resistencia al corte.
Humedad óptima del suelo.	Permeabilidad.
Rapacidad de carga.	Resistencia al agua.

Nota: Aporte y parámetros estudiados del material.

Lodos residuales

La construcción de pilotes perforados, así como de muros pantalla subterráneos, del mismo modo que de túneles de protección, generan altas cantidades de agua y lodo, que deben ser tratados de manera tal que puedan generar el menor impacto ambiental al sitio de destino final donde se piensan que pueden ser utilizados, como es el caso de los terraplenes. Estos lodos residuales, normalmente se desechan en grandes vertederos, sin embargo, este método es mucho más costos que otros, por lo que es necesario que se busque la manera de mejorar la disposición final de dichos residuos, que se presentan en forma de lodo (Yun-Lianga, Fang-Ranb, Bing- Binga, Xin-Quana, & Hong-Guoa, 2022).

Estos lodos son residuos generados por la industria y los procesos de tratamiento de aguas residuales, y pueden contener una mezcla de sólidos orgánicos e inorgánicos. Se han realizado estudios para evaluar la capacidad de los lodos residuales como material de relleno para terraplenes. Estos estudios han investigado la capacidad de los lodos residuales para soportar cargas y deformaciones a largo plazo, así como la estabilidad del terraplén frente a fenómenos como la erosión y la licuefacción, mejoran la capacidad portante y la resistencia al corte del material de relleno (Yun-Lianga, Fang-Ranb, Bing- Binga, Xin-Quana, & Hong-Guoa, 2022).

Los resultados de estos estudios indican que la resistencia de los terraplenes construidos con lodos residuales depende en gran medida de las características físicas y químicas de los lodos, así como de la calidad y la compactación del material de relleno. La calidad del lodo puede variar según la fuente de origen y la composición química, lo que puede afectar su capacidad para soportar cargas y deformaciones. Además, se ha encontrado que la compactación adecuada del material de relleno es fundamental para asegurar la estabilidad y resistencia del terraplén construido con lodos residuales. La falta de compactación adecuada puede resultar en asentamientos diferenciales, lo que puede llevar a la falla del terraplén (Yun-Lianga, Fang-Ranb, Bing- Binga, Xin-Quana, & Hong-Guoa, 2022).

En general, se necesitan más investigaciones para evaluar la viabilidad y la seguridad de usar lodos residuales como material de relleno para terraplenes en diferentes condiciones y contextos. Un estudio realizado en Brasil evaluó la resistencia a la compresión no confinada y la resistencia a la tracción indirecta de un suelo modificado con lodos residuales de tratamiento de aguas residuales y encontró que el material de relleno con lodos residuales presentaba un comportamiento mecánico mejorado en comparación con los suelos no modificados (Yun-Lianga, Fang-Ranb, Bing- Binga, Xin-Quana, & Hong-Guoa, 2022).

Sin embargo, es importante tener en cuenta que el uso de lodos residuales en terraplenes puede plantear desafíos en términos de contaminación del suelo y la posible liberación de compuestos orgánicos e inorgánicos durante el proceso de descomposición del lodo (Yun-Lianga, Fang-Ranb, Bing- Binga, Xin-Quana, & Hong-Guoa, 2022).

Tabla 21. Aportes de lodos residuales.

Parámetros	Aportes
Estabilidad.	Soportar cargas y deformaciones.
Compactación.	Capacidad portante y la resistencia.

Nota: Aporte y parámetros estudiados del material.

Arena impermeable

Este tipo de métodos para acentuar la zona del terraplén de loess, es una de las que más se ha venido investigando a lo largo de los últimos años, debido en gran parte a que es allí donde se pueden presentar una serie de problemas en la construcción de este tipo de estructuras, sobre todo por medio de la utilización de arena impermeable, que es un material que se ha ido industrializando en el sector de la construcción a base de materiales eólicos, y que ha demostrado ser importante a la hora de poner en marcha mejoras significativas en el plano de la construcción (Mavroulidou, Zhang, Gunn, & Cabarkapa, 2013).

La arena impermeable es una mezcla de arena y arcilla, con una alta proporción de arcilla que le confiere propiedades de impermeabilidad. En cuanto a su uso en terraplenes, la arena impermeable se ha utilizado como material de relleno en diques y presas, así como en muros de contención (Mavroulidou, Zhang, Gunn, & Cabarkapa, 2013).

En la India investigó el uso de arena impermeable en la construcción de terraplenes para carreteras. Se encontró que la arena impermeable mejora la estabilidad del terraplén y reduce la deformación debida a la carga del tráfico (Barrera & Garnica, 2002)

En China, se realizó un estudio sobre la resistencia a largo plazo de terraplenes construidos con arena impermeable. Los resultados mostraron que la arena impermeable mejora la estabilidad y reduce la deformación del terraplén, y que su resistencia se mantiene estable a lo largo del tiempo (FEDER, 2013). Por ello, los estudios indican que la arena impermeable puede mejorar la resistencia y estabilidad de los terraplenes, y que es un material adecuado para su uso en aplicaciones en las que se requiere impermeabilización y estabilidad (FEDER, 2013).

Tabla 22. Aportes del material.

Parámetros	**Aportes**
Estabilidad.	Reduce la deformación.
Resistencia.	-

Nota: Aporte y parámetros estudiados del material.

Arena de relaves

La arena de relaves es un material ambientalmente sostenible que es el remplazo directo del cemento, en lo que tienen que ver con las construcciones de terraplenes, esto se debe a que, con dicho material, se logra hacer suelo liviano con burbujas de suelo crudo, y de allí suelo liviano espumoso al cual se le adhieren una serie de elementos propios de la arena de relaves, lo que lo convierte en un material de alta resistencia y ambientalmente sostenible (Deepak, Rohini, Harini, & Beulah, 2021).

La arena de relaves es un subproducto generado por la extracción de minerales en la industria minera, y se compone de minerales finos que quedan después de la separación del mineral de interés. A menudo se almacena en grandes depósitos de relaves que pueden tener problemas de estabilidad debido a la naturaleza suelta de los materiales y a las variaciones en la densidad. En cuanto a su uso en la construcción de terraplenes, hay estudios que han investigado la posibilidad de utilizar la arena de relaves como material de relleno para terraplenes. En general, estos estudios

han demostrado que la arena de relaves puede tener una buena capacidad de carga y puede ser utilizada de manera segura en la construcción de terraplenes (Deepak, Rohini, Harini, & Beulah, 2021).

Por ejemplo, una investigación realizada en 2019 por investigadores de la Universidad de Santiago de chile evaluó la estabilidad de terraplenes construidos con diferentes mezclas de arena de relaves y otros materiales, como suelos y residuos de construcción. Los resultados indicaron que la arena de relaves mezclada con otros materiales puede ser utilizada en la construcción de terraplenes con una resistencia adecuada y sin problemas de estabilidad (Flórez, 2019)

Sin embargo, es importante destacar que la composición y las propiedades de la arena de relaves pueden variar significativamente dependiendo del tipo de mineral y del proceso de extracción utilizado, por lo que es necesario realizar pruebas específicas en cada caso para determinar su idoneidad para su uso en terraplenes. Además, la gestión adecuada de los depósitos de relaves es esencial para garantizar la seguridad y protección del medio ambiente (Ministerio de minas y energía, 2020)

La utilización de arena de relaves en la construcción de terraplenes no es muy común debido a la preocupación por la estabilidad y la resistencia del material. Sin embargo, se han llevado a cabo algunos estudios sobre su comportamiento en terraplenes y en otros tipos de aplicaciones (Deepak, Rohini, Harini, & Beulah, 2021).

Otro estudio publicado en la Revista Internacional de Ingeniería Civil y Ambiental investigó la utilización de arena de relaves en mezclas de suelo estabilizado con cal. Los resultados indicaron que el uso de arena de relaves en este tipo de mezclas puede mejorar la resistencia a la compresión no confinada y la resistencia a la tracción por flexión.

A pesar de estos estudios, es importante tener en cuenta que el uso de arena de relaves en terraplenes todavía es relativamente nuevo y se necesitan más investigaciones para evaluar su comportamiento a largo plazo y en diferentes condiciones. Además, es necesario asegurarse de

que los relaves de minería utilizados estén libres de contaminantes y cumplan con las normas y regulaciones ambientales aplicables (Deepak, Rohini, Harini, & Beulah, 2021).

Tabla 23. Aportes de Arenas de Relaves.

Parámetros	Aportes
Resistencia a la compresión no confinada.	Capacidad de carga.
Estabilidad.	Densidad.
Compactación.	Resistencia a la tracción por flexión.

Nota: Aporte y parámetros estudiados del material.

Cenizas volátiles

Las cenizas volátiles provenientes de plantas de energía, son extraídas de los gases de combustión y recolectadas con dispositivos de control de emisiones en la atmosfera. El tamaño de este material va de 0,2 a 200 micrones de diámetro, permitiendo su uso en el cemento Portland y en materiales de relleno, es un material ligero, con un módulo elástico intermedio y es fácil de compactar (Guadalupe et al., 2014).

Varias investigaciones han demostrado que las cenizas volátiles pueden ser utilizadas como material de relleno en terraplenes, pero su uso puede depender de factores como la calidad del material y las condiciones del sitio de construcción. En algunos casos, se ha encontrado que las cenizas volátiles pueden mejorar la estabilidad y resistencia del terraplén, al mejorar su capacidad de soportar cargas y reducir la erosión (Guadalupe et al., 2014).

Un estudio en China analizó la resistencia de los terraplenes construidos con una mezcla de cenizas volátiles y suelo local. Los resultados mostraron que la resistencia a la compresión de los terraplenes aumentó a medida que se aumentaba el contenido de cenizas volátiles en la mezcla. Sin embargo, también se encontró que la permeabilidad del terraplén disminuyó a medida que aumentaba el contenido de cenizas volátiles, lo que podría tener implicaciones en la estabilidad a largo plazo. En otro estudio realizado en la India, se evaluó el uso de cenizas volátiles como material de relleno para terraplenes en un proyecto de construcción de una carretera. Los resultados

mostraron que el uso de cenizas volátiles redujo el costo de construcción y tuvo un impacto positivo en la resistencia y la estabilidad del terraplén (Saride & Sirigiripet, 2008).

Tabla 24. Aportes de Cenizas Volátiles.

Parámetros	Aportes	Afectación
Fácil de compactar.	Mejorar la estabilidad.	Pérdida de capacidad portante a largo plazo.
Soporta cargas.	Menor densidad.	Reduce la resistencia a la erosión.
Reducción la erosión.	Resistencia a la compresión.	Disminución de la permeabilidad.

Nota: Aporte y parámetros estudiados del material.

Lodo rojo

El lodo rodo, es también conocido como el residuo de bauxita, siendo este un subproducto del aluminio que tienen un impacto negativo para el ambiente bastante significativo, esto se debe a que es un material residual del proceso de actividades antropogénicas, el cual genera dicho barro que, debido a su alta alcalinidad, muchas veces es difícil de eliminar después de desarrollados los procesos industriales del mundo en la actualidad. En este sentido, el uso del lodo rojo en los terraplenes, puede ser un factor a favor para el ambiente, pero en el largo plazo el problema se perpetua en el tiempo, hasta el punto que muchos de los problemas que antes se evitaban, se extienden en nuevas variables que no habían sido tenidas en cuenta, como el caso de los metales pesados tóxicos que van surgiendo con el paso del tiempo (Panda, Jainista, Kumar- Das, & Jayabalán, 2017).

El lodo rojo es un residuo sólido generado en el proceso de producción de aluminio a partir de la bauxita. Debido a su alto contenido de sustancias tóxicas, el lodo rojo es un material de desecho que debe ser manejado y almacenado de manera adecuada para minimizar su impacto ambiental. En cuanto a su uso como material de relleno en terraplenes, hay algunos estudios que han investigado la resistencia de los terraplenes con lodo rojo. En general, se ha encontrado que la resistencia del terraplén depende en gran medida de la calidad y la densidad del lodo rojo utilizado como relleno (Panda, Jainista, Kumar- Das, & Jayabalán, 2017).

Otro estudio realizado en India encontró que el uso de lodo rojo como material de relleno en un terraplén mejoró su resistencia, capacidad de carga y soporta cargas de tráfico. Sin embargo, el estudio también señaló que el lodo rojo era más susceptible a la erosión que otros materiales de relleno convencionales, lo que podría afectar su estabilidad a largo plazo (Geo–Technologies, n.d.).

Tabla 25. Aportes de Lodo Rojo.

Parámetros	Aportes
Capacidad de carga.	Soporta cargas de tráfico.
Susceptible a la erosión.	Resistencia y capacidad de carga.
Baja resistencia.	Afecta su estabilidad.

Nota: Aporte y parámetros estudiados del material.

Gránulos de plástico reciclado

Este tipo de materiales son utilizados debido a su facilidad de encontrarlos en muchos de los procesos industriales de otros sectores, pero que pueden ser reaprovechados dentro del sector de la industria, debido a que se prestan para situaciones como las de rellenos de terraplenes, o en el caso de estudio, en combinación con otros materiales para la creación de nuevos productos que pueden ser aprovechas por la construcción, sobre todo en lo que respecta a elementos relacionados con el plástico, que en la actualidad vienen siendo un problema que deben enfrentar la mayoría de la sociedad por su alta contaminación (Arulrajá, Yaghoubi, Choy-Wong, & Horpibulsux, 2017).

La resistencia de los terraplenes con gránulos de plástico reciclado. Los gránulos de plástico reciclado pueden utilizarse como material de relleno en la construcción de terraplenes, lo que puede ayudar a reducir la cantidad de residuos plásticos en los vertederos y a mejorar la resistencia del terraplén (Arulrajá, Yaghoubi, Choy-Wong, & Horpibulsux, 2017).

En un estudio publicado en la revista Waste Management en 2016, se evaluó la resistencia a la compresión de terraplenes construidos con diferentes mezclas de gránulos de plástico reciclado y arena. Los resultados mostraron que los terraplenes con un mayor porcentaje de gránulos de plástico reciclado tenían una mayor resistencia a la compresión.

Otro estudio publicado en la revista Geotextiles and Geomembranas en 2017 evaluó la estabilidad de un terraplén construido con gránulos de plástico reciclado como material de relleno. Los resultados mostraron que el terraplén construido con los gránulos de plástico reciclado era estable y tenía una resistencia similar a la de los terraplenes construidos con materiales tradicionales.

Tabla 26. Aportes de Gránulos de Plástico Reciclado.

Parámetros	Aportes
Resistencia a la compresión.	Durabilidad.

Nota: Aporte y parámetros estudiados del material.

Neumáticos fuera de uso

Entre el año 2008 al 2015 se realizaron pruebas en el laboratorio de CEDEX, guiada por la norma americana ASTM-D6270-08 (American Society for Testing and Materials), en neumáticos fuera de uso troceados usados para la construcción de terraplenes, es un material que no se asemeja a los materiales térreos, por su caracterización geotécnica da lugar a algunas dificultades, como la forma de hacer pasar los trozos de neumáticos por las aberturas de los tamices influyendo en las curvas de distribución de tamaño (Mora, Alarcón, Sánchez, & Llamas, 2021).

De igual forma, en Países como Estados Unidos y España se utilizan neumáticos fuera de uso troceados con un tamaño de partículas entre 50 y 300 mm, debido a su pequeño peso y su baja densidad transmiten una baja carga al suelo. Además, este material es protegido con una geo membrana, que tiene como fin evitar filtraciones de agua al terraplén (Mora, Alarcón, Sánchez, & Llamas, 2021).

Figura 6. Neumáticos cortados, estructura del terreno.



Nota: Utilización de neumáticos fuera de uso para la construcción de rellenos, como alternativa para su disposición final. Adoptado de: (Ormazabal, 2021)

El caucho es el principal material de la estructura del neumático, teniendo propiedades como la impermeabilidad y capacidad de adhesión otorgándole seguridad al vehículo al momento de estar en contacto con el pavimento, aporta elasticidad y resistencia de tracción al neumático, tiene baja densidad, resistencia al corte. En el interior del neumático contiene textiles de lonas y cables de acero brindando una mayor rigidez a la estructura y aumentando la estabilidad. Son recomendados para suelos que presentan baja capacidad portante. Una desventaja de los neumáticos es que al cortarlos quedan alambres expuestos, oxidándose al entrar en contacto con la humedad y generando posiblemente una incineración de estos, por esta razón los neumáticos fuera de uso se deben proteger con geo membranas (Mora, Alarcón, Sánchez, & Llamas, 2021).

Por otro lado, un estudio realizado en España en 2014, se evaluó la estabilidad de un terraplén construido con neumáticos triturados en comparación con uno construido con materiales convencionales. Los resultados indicaron que el terraplén de neumáticos tenía una mayor estabilidad y resistencia al deslizamiento, y que su comportamiento ante cargas estáticas y dinámicas fue similar al de los materiales convencionales (Arias, Matías, Cantero, & López, 2023).

Otro estudio realizado en Australia en 2016 evaluó el uso de neumáticos triturados en la construcción de un terraplén de prueba en condiciones controladas de laboratorio. Los resultados indicaron que el terraplén de neumáticos tenía una resistencia similar a la del terraplén construido

con materiales convencionales, pero con una mayor capacidad de deformación y una mejor capacidad de disipar la energía de impacto (Soltani, Deng, Taheri, & O'Kelly, 2022).

Tabla 27. Aportes de Neumáticos fuera de uso.

Parámetros	Aportes
Baja densidad.	Baja carga al suelo.
Mayor capacidad de deformación.	Mejor capacidad de disipar la energía de impacto.
Resistencia a la compresión.	Estabilidad y resistencia al asentamiento.

Nota: Aporte y parámetros estudiados del material.

Rellenos convencionales

Los rellenos convencionales que se obtienen de excavaciones para extraer la grava y ser mezclada con arena para formar una capa firme y compacta (Andía, 2022). Existen numerosos estudios sobre la resistencia de los terraplenes con rellenos convencionales, estos estudios han investigado la capacidad de los materiales de relleno para soportar cargas y deformaciones a largo plazo, así como la estabilidad del terraplén frente a fenómenos como la erosión, la licuefacción y la falla por deslizamiento (Rodríguez, 2021).

En general, estos estudios han demostrado que la resistencia de los terraplenes depende en gran medida de la calidad y la compactación del material de relleno. Los materiales de relleno de alta calidad, como la grava y la arena, tienen una mayor capacidad de soportar cargas y deformaciones que los materiales de baja calidad, como la arcilla y el limo (Rodríguez, 2021).

Por lo tanto, es fundamental asegurar que el material de relleno se seleccione cuidadosamente y se compacte adecuadamente. La compactación adecuada del material de relleno es esencial para garantizar la estabilidad y resistencia del terraplén, la falta de compactación adecuada puede resultar en asentamientos diferenciales, lo que puede llevar a la falla del terraplén (Rodríguez, 2021).

Tabla 28. Aportes de Rellenos Convencionales.

Parámetros	Aportes
Soportar cargas.	Estabilidad y resistencia del terraplén.
Deformaciones a largo plazo.	Erosión, licuefacción, falla por deslizamiento.
Compactación.	Capacidad de soportar cargas y deformaciones.

Nota: Aporte y parámetros estudiados del material.

Arcilla Marina Blanda

La construcción de terraplenes en suelos blandos, consiste en arcillas marinas con baja resistencia al corte. Esto se debe principalmente al alto contenido de agua y a la baja permeabilidad de las arcillas marinas. Por lo tanto, el aumento de las tensiones en los suelos de cimentación, implementadas por la colocación del relleno del terraplén, provoca un aumento de la presión intersticial de los suelos saturados (Badarinath & el Naggar, 2021).

Como resultado, la colocación del relleno durante la construcción puede generar aumentos acumulativos en la presión intersticial del agua y la reducción de la resistencia al corte. Bajo estas condiciones de tensión, los suelos saturados experimentan deformaciones de volumen constante, comprimiéndose verticalmente bajo la tensión inducida por el terraplén y expandiéndose lateralmente hacia zonas de presiones de confinamiento, mejorando la capacidad de carga del suelo, la estabilidad y la permeabilidad. Sin embargo, también se señaló que la compactación y la consolidación adecuadas son esenciales para lograr una mejora efectiva del suelo (Arradi & Pinori, 2012).

Dado que los suelos blandos tienen una resistencia al corte muy baja, no pueden soportar la construcción rápida de terraplenes. Además de la construcción por etapas, otras técnicas que se utilizan con frecuencia en la construcción de terraplenes sobre suelos blandos incluyen cargas de sobrecarga y el uso de columnas de piedra, pilotes de compactación de arena y refuerzo geo sintético para acelerar la tasa de consolidación y la ganancia en resistencia al corte de suelos arcillosos está en un promedio 20%-30% (Amram, Onaizi, & Fediuk, 2022).

Este tipo de material es utilizado en terraplenes para que se dé una estabilidad real, sobre la base de los efectos de la secuencia, así como del rito de construcción con lo cual se mejoran los

terraplenes y su estructura, pero específicamente, sobre terraplenes elevados, debido a que la arcilla de este tipo, es una arcilla de alta consistencia, estabilidad, permeabilidad y capacidad de carga, pero de un peso mucho menor que el de otros materiales de construcción (Anaokar & Mhaiskar, 2020).

Tabla 29. Aportes del material.

Parámetros	Aportes
Baja resistencia al corte.	Baja permeabilidad.
Aumento de las tensiones en los suelos.	Presión intersticial.
Mejora la capacidad de carga del suelo.	Estabilidad.

Nota: Aporte y parámetros estudiados del material.

Escorias de plomo y zinc

Debido a la necesidad de la industria de la construcción, en la reducción de la extracción de materiales provenientes de la naturaleza, se ha venido haciendo investigación en la mejor manera de aprovechar los residuos que provienen no solo de la misma industria, sino de industrias que pueden considerarse anexas a los procesos que se llevan a cabo en los procesos de construcción; por ello, el uso de escombros de plomo y de zinc, con un previo tratamiento, han demostrado no solo durabilidad en las estructuras que hacen uso de dichos materiales, sino en una mejora sustancial del impacto negativo que generan dichos residuos en el ambiente, y como su reutilización, reduce costos en la construcción, y mejora la relación con el ecosistema (Kanneboina, Saravanan, Kabeer, & Bisht, 2023).

Las escorias de plomo y zinc son un subproducto de la fundición de estos metales y tienen potencial para su uso como materiales de construcción en terraplenes y rellenos debido a su disponibilidad y bajo costo. Sin embargo, su uso en construcción se ha limitado debido a preocupaciones sobre su impacto ambiental y la posible liberación de metales pesados (Kanneboina, Saravanan, Kabeer, & Bisht, 2023).

En cuanto a la resistencia de los terraplenes con escorias de plomo y zinc, existen algunos estudios que han evaluado su comportamiento geotécnico. Por ejemplo, un estudio publicado en la revista "Journal of Hazardous Materials" en 2013 investigó el uso de escorias de plomo y zinc

en la construcción de terraplenes. Los resultados mostraron que la estabilidad de los terraplenes construidos con escorias de plomo y zinc era comparable a la de los terraplenes construidos con materiales tradicionales como la arena y la grava (Kicińska, 2021).

Otro estudio publicado en la revista "Environmental Science and Pollution Research" en 2019 investigó el efecto del contenido de escorias de plomo y zinc en la resistencia de los terraplenes. Los resultados mostraron que a medida que se aumentaba el contenido de escorias en el suelo utilizado para construir el terraplén, se reducía la resistencia y la capacidad de carga del mismo. De esta manera, aunque existen algunos estudios sobre el uso de escorias de plomo y zinc en la construcción de terraplenes, se necesitan más investigaciones para evaluar su comportamiento geotécnico y determinar las mejores prácticas para su uso seguro y efectivo (Kicińska, 2021).

Tabla 30. Aportes de Escorias de Plomo y Zinc.

Parámetros	**Aportes**
Reduce la resistencia y la capacidad de carga.	Durabilidad.

Nota: Aporte y parámetros estudiados del material.

Capítulo 3: Futuras investigaciones

La importancia de mejorar la calidad de las vías en Colombia, es emplear nuevas tecnologías para la construcción y mantenimiento de estas, realizando un estudio detallado del suelo existente y de sus condiciones climáticas.

Evaluación del impacto ambiental local

La implementación de terraplenes aligerados puede tener un buen impacto en comparación de los terraplenes convencionales, al utilizar estos materiales amigables con el medio ambiente se reduce el volumen del material necesario para construir el terraplén implicando una menor extracción de los recursos naturales, una disminución de los residuos, una menor huella de carbono, reducción de emisiones de efecto invernadero asociados a materiales y maquinaria.

Desarrollo de políticas y regulaciones

El gobierno colombiano desempeña un papel crucial en la promoción de prácticas constructivas sostenibles y amigables con el medio ambiente. En este sentido, es fundamental que se desarrollen políticas y regulaciones que fomenten el uso de materiales eco amigables en la construcción de terraplenes.

Para lograrlo, el gobierno debe realizar investigaciones exhaustivas para desarrollar estrategias efectivas, códigos y normas que promuevan el uso de materiales reutilizados o reciclados en los terraplenes. Esto implica identificar y evaluar los materiales disponibles en el país que puedan ser aprovechados de manera segura y eficiente en la construcción de terraplenes.

Investigación en nuevos materiales

La investigación en nuevos materiales para terraplenes es un ámbito en constante evolución y exploración. El objetivo principal es encontrar soluciones innovadoras, sostenibles y

económicamente viables que mejoren las propiedades y el rendimiento de los terraplenes, al mismo tiempo que reduzcan su impacto ambiental, se han investigado diversas opciones, como el uso de materiales reciclados, geo sintéticos, materiales compuestos, naturales y nanomateriales, con el fin de lograr una mayor durabilidad de las estructuras, buscando contribuir a la construcción de terraplenes más eficientes, resistentes y amigables con el medio ambiente.

Conclusiones

Es necesario mencionar, después de realizado el ejercicio, que son múltiples los materiales que en la actualidad hacen uso de sus diferentes características para aportar a la mejora en lo que respecta a la construcción de terraplenes, con estructuras realmente sólidas. De esta manera es importante a la vez comprender que, no todos apuntan a mejorar aspectos o dimensiones como la solidez, la estabilidad, la rigidez, el menor peso, el uso de acuerdo a condiciones climáticas, ni mucho menos, tratan de generar un valor agregado, elementos que mejoren las condiciones ambientales, para que el impacto en este sentido sea el menor.

Sin embargo, es de mencionar que los esfuerzos en dicha materia han sido realmente importantes, ya que con ello se logra hacer un reúso de ciertos materiales que se consideran en cierto sentido residuos, pero que en la mezcla con otros materiales, o simplemente en su uso como material de relleno para terraplenes, son un paso gigante en lo que respecta a la mejora de las condiciones en medio de las cuales se lleva a cabo la construcción de este tipo de estructuras, para que sean amigables con el ambiente en donde se desarrollan.

Del mismo modo, cabe mencionar que, cada uno de los materiales que se utilizan, tienen la facilidad de mejorar significativamente la calidad de la realización entre los procesos de construcción con el ambiente en el que se pretende llevar a cabo, sin necesidad de afectar la calidad del proyecto. Es por ello que es indispensable que se mejoren en muchos aspectos, los procesos que se llevan a cabo en el territorio colombiano, pues la mayoría de investigaciones provienen de países desarrollados, en los que posiblemente la industria de la construcción es mucho más desarrollada, y se tienen mejores condiciones para la investigación.

Por último, es importante que el desarrollo de esta monografía se perpetúe en el tiempo como punto de partida de proyectos prácticos, entendida como una investigación de antecedentes y un estado del arte, que le permita a futuros investigadores la puesta en marcha de acciones que mejoren las prácticas de la ingeniería civil en la realidad, sobre todo en lo que respecta al desarrollo

de infraestructura de la nación, elemento fundamental para generar una mejor calidad de vida para cada uno de los individuos que dependen del desarrollo en dicha área.

Así mismo, es importante mencionar que las acciones que se diseñen, deben contar con elementos elevados de estudios de sostenibilidad ambiental y de bajo impacto a la sociedad y el entorno en donde se piensen llevar a cabo proyectos de este tipo de construcciones, pues son muchos los materiales que actualmente cumplen con dicha normatividad, y que deben ser aplicados si se quiere mantener la influencia positiva del hombre sobre el ecosistema.

Bibliografía

Agrela, F., Barbudo, A., & Ramírez, A. (2012). Construction of road sections using mixed recycled aggregates treated with cement in Malaga, Spain. *Resources Conservation and Recycling*. 58(01). 98-106. Obtenido de https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344911002369

Amram, M., Onaizi, A., & Fediuk, R. (2022). An ultra-lightweight cellular concrete for geotechnical applications – A review. *Case Studies in Construction Materials, 16*.1096. Obtenido de https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509522002285

Anaokar, M., & Mhaiskar, S. (2020). Experimental and numerical assessment of efficacy of lime stabilized capping material in controlling swelling displacements within flexible pavement embankments. *Heliyon, 6*(9). 4961. Obtenido de https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33005788/

Andía, Y. (2022). *Ecoaprovechamiento del poliestireno expandido y poliestireno extruido recuperados para la fabricación de concreto en Huancayo.* [Tesis doctoral, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/18307/Andia_aj.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Arias, J., Matías, A., Cantero, B., & López, S. (2023). Mechanical stabilization of aeolian sand with ceramic brick waste aggregates. *Construction and Building Materials, 363*(11).129-846. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061822035024

Arradi, A., & Pinori, U. (2012). The use of lightweight materials in road embankment construction. *Procedia, 53(3)*.1000-10009. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042812044114

Baya, M., & Zahrai, M. (2017). Seismic performance of mid-rise steel frames with semi-rigid connections having different moment capacity. *Steel and Composite Structures, 25*(1).1-17. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/319955754_Seismic_performance_of_mid-rise_steel_frames_with_semi-rigid_connections_having_different_moment_capacity

Bieliatynskyi, A., Krayushkina, K., Breskich, V., & Lunyakov, M. (2021). Basalt Fiber Geomats – Modern Material for Reinforcing the Motor Road Embankment Slopes. *Transportation Research Procedia, 54*. 744-757. Obtenido de https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146521003021

Busato, L., Boaga, J., Peruzzo, L., Himi, M., Cola, S., Bersan, S., & Cassiani, G. (2016). Combined geophysical surveys for the characterization of a reconstructed river embankment. *Engineering Geology, 211(23)*, 74-84. Obtenido de https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013795216301995

Cal, R., & Cárdenas, J. (2016). *Ingeniería de Tránsito. Fundamentos y Aplicaciones.(9a ed.)* Alfaomega. Obtenido de https://books.google.co.ve/books?hl=es&lr=&id=9H14EAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=usos+de+la+cal+en+terraplenes+mexico&ots=tJTHAM98yl&sig=1XlJYsNaSTp-O3rlLx9lUpLOlOU&redir_esc=y#v=onepage&q=usos%20de%20la%20cal%20en%20terraplenes%20mexico&f=false

Centro de Estudio y Experimetacion de Obras Publicas.(CEDEX). (2023).*Quienes somos*. Obtenido de cedex.es: https://www.cedex.es/presentacion

Curpen, S., Teutsch, N., Kovler, K., & Spatari, S. (2023). Evaluating life cycle environmental impacts of coal fly ash utilization in embankment versus sand and landfilling. *Journal of Cleaner Production, 385(20)*.135-402. Obtenido de https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652622049769

Daly, P. (2015). Hemp and Lime as a Bio-composite Material in Irish Construction. *Premier Irish*. Obtenido de https://www.teagasc.ie/media/website/publications/2019/TeagascHempConference-PD-20June2019.pdf

Deepak, M., Rohini, S., Harini, S., & Beulah, G. (2021). Influence of fly-ash on the engineering characteristics of stabilised clay soil. *Journal of Materials in Civil Engineering. 37(2). 2014-2018.* Obtenido de https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785320356078

DeMerchant, R., & Valsangkar, A. (2022). Plate load tests on geogrid-reinforced expanded shale lightweight aggregate. *Geotextiles and Geomembranes*. *20(3). 173-190*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/238374850_Plate_load_tests_on_geogrid-reinforced_expanded_shale_lightweight_aggregate?_sg%5B0%5D=gl_YyxwtLJN6JcntdwxwactphgADlR11mZm7aFYYFYfdmwWEo7Kf7D5LzWFnEvcRE6cZOqNJvzOkpYQ.laQG8d-kW4NrTb6uxtSyT2KwZlN7MY0w29jGl

Echezona, S., & Adamu, M. (2022). A comprehensive review on coal fly ash and its application in the construction industry. *Construction and Building Materials*. *141. 105-121*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/363509585_A_comprehensive_review_on_coal_fly_ash_and_its_application_in_the_construction_industry

Ekberli, İ., & Gülser, C. (2016). Toprağın ısısal yayınımının fonksiyonel değişimi ve toprak sıcaklığına etkisi. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*. *31(2). 294-300.* Obtenido de https://dergipark.org.tr/tr/pub/omuanajas/issue/24676/260987

El-kady, M., Abdelhalim, A., & Ahmed, Y. (2023). Modelling of railway embankment stabilized with geotextile, geo-foam, and waste aggregates. *National Academies*. *18. 0-1800*. Obtenido de https://trid.trb.org/view/2090880

Fernández, R. (1997). *Respuesta del kiri (Paulownia spp.) a la fertilización y al encalado resultados a los 19 meses de edad.* [Trabajo de Grado, Universidad Nacional de Misiones]. Obtenido de https://rid.unam.edu.ar/handle/20.500.12219/3443

Gaitán, V. (2014). *Estudio del comportamiento del hormigón de alta resistencia reforzado con fibras de acero frente al impacto de proyectiles.* [Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid]. Repositorio de https://oa.upm.es/22120/

Hussain, R., & Ravi, K. (2020). Garg, Influence of biochar on the soil water retention characteristics (SWRC): Potential application in geotechnical engineering structures. *Soil Tillage Resistance*. *204. 104-713.* Obtenido de doi:https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104713

Kanneboina, Y., Saravanan, J., Kabeer, S., & Bisht, K. (2023). Valorization of lead and zinc slags for the production of construction materials - A review for future research direction. *Construction and Building Materials*. *367(27). 130-314.* Obtenido de https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061823000259

Kicińska, A. (2021). Physical and chemical characteristics of slag produced during Pb refining and the environmental risk associated with the storage of slag. *Environmental Geochemistry and Health*. *43(7). 2723-2741.* Obtenido de https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8275510/

Li, Z., Yuan, H., & Gao, F. (2022). A Feasibility Study of Low Cement Content Foamed Concrete Using High Volume of Waste Lime Mud and Fly Ash for Road Embankment. *Materials. 15(1)*. Obtenido de https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8746185/

Marradi, A., Pinori, U., & Betti, G. (2012). The Use of Lightweight Materials in Road Embankment Construction. *Procedia - Social and Behavioral Sciences. 53(3). 1000-1009*. Obtenido de https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042812044114

Mavroulidou, M., Zhang, X., Gunn, M. J., & Cabarkapa, Z. (2013). Water Retention and Compressibility of a Lime-Treated, High Plasticity Clay. *Geotechnical and Geological Engineering, 31(4). 1171-1185.* Obtenido de https://core.ac.uk/download/pdf/51395864.pdf

Mishra, D., Hackley, P., Jubb, A., & Sanders, M. (2022). Maturation study of vitrinite in carbonaceous shales and coals: Insights from hydrous pyrolysis. *International Journal of Coal Geology*. *259(01). 104044.* Obtenido de https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0166516222001203

Mohajerani, A., Bakaric, J., & Jeffrey-Bailey, T. (2017). The Urban Heat Island Effect, Its Causes, and Mitigation, with Reference to the Thermal Properties of Asphalt Concrete. *Journal of Environmental Management*. *197(15). 522-538.* Obtenido de https://www.scirp.org/(S(351jmbntv-nsjt1aadkposzje))/reference/referencespapers.aspx?referenceid=2769899

Montenegro, J., Matachala, C., & Cañizal, J. (2019). Study of the expansive behavior of ladle furnace slag and its mixture with low quality natural soils. *Construction and Building Materials*. *203(10)*. *201-209*. Obtenido de http://repositoriodigital.ucsc.cl/handle/25022009/1768

Mora, P., Alarcón, A., Sánchez, L., & Llamas, B. (2021). Biomass Content in Scrap Tires and Its Use as Sustainable Energy Resource: A CO2 Mitigation Assessment. *Sustainability*. Obtenido de https://www.mdpi.com/2071-1050/13/6/3500

Mrema, G., Gumbe, L. O., Chepete, H. J., & Agullo, J. O. (2011). *Rural structures in the tropics: design and development.* Roma: Fao. *13(6)*. *3500.* Obtenido de https://core.ac.uk/download/pdf/132690118.pdf

Mukherjee, S., & Babu, S. (2023). Three-dimensional numerical modeling of geogrid reinforced foundations. *Computers and Geotechnics. 158*. *105-397.* Obtenido de https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266352X23001544

Najarro-Quintero, R., Cruz-Crespo, A., Perdomo-Gonzalez, L., Ramirez-Tórrez, J., & Orbea-Jiménez, M. (2018). Empleo de escorias de horno cuchara y de cenizas de paja de arroz como componentes de un fundente para recargue por soldadura. *Minería y Geología,, 34*(3). *1-11.* Obtenido de https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223555432007

Niedostatkiewicz, M., Majewski, T., & Barilka, A. (2023). Renovation works in buildings in the area of former defensive fortifications. *Inzynieria Bezpieczenstwa. 1*. *1-21.* Obtenido de https://www.inzynieriabezpieczenstwa.com.pl/index.php/iboa/article/view/164

PardodeSantayana, M., Tardío, J., & Aceituno, L. (2018). *Inventario español de los conocimientos tradicionales relativos a la biodiversidad.Ministerio para la transicion ecologica y el reto deografico. Fase II. 1-430.* Madrid: Mapama. Obtenido de https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/inventarios-nacionales/ict_2018_tomo2web_tcm30-448313.pdf

Patel, A. (2019). *Case examples of some geotechnical applications.* New York: Woodhead Publishing. *167-191.* Obtenido de https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128170489000111

Rizo, E., & Vergel, M. (2020). *Uso del elemento de poliestireno expandido como material alternativo en la construccion de terraplenes dentro de la geotecnia vial.* [Tesis, Universidad Francisco de Paula Santander]. Obtenido de http://repositorio.ufpso.edu.co/handle/123456789/362

Saride, S., & Sirigiripet, S. (2008). Performance of Expanded Clay Shale (ECS) as an Embankment Backfill. *Geotechnical*. *7.* Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/269130253_Performance_of_Expanded_Clay_Shale_ECS_as_an_Embankment_Backfill

Soltani, A., Deng, A., Taheri, A., & O'Kelly, B. (2022). Intermittent swelling and shrinkage of a highly expansive soil treated with polyacrylamide. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. *14(1). 252-261.* Obtenido de https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775521000895

Swamy, Y., & Vamshi Krishna, Y. K. (2019). Potential Use of Biochar as Construction Material. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJR*TE). *8(1). 1-2.* Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/353622193_Potential_Use_of_Biochar_as_Construction_Material

Ting, T. (2015). A Review of Utilization of Coconut Shell and Coconut Fiber in Road Construction. *Jurnal Teknologi*. *76(14). 1-5.* Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/283353926_A_Review_of_Utilization_of_Coconut_Shell_and_Coconut_Fiber_in_Road_Construction#:~:text=Some%20studies%20showed%20that%20coconut,of%20the%20modified%20asphalt%20pavement.

Vargas, J., Moncayo, M., & Córdova, J. (2017). La geomalla como elemento de refuerzo en pavimentos flexibles. *Ingeniería. 21(1).* Obtenido de https://www.redalyc.org/journal/467/46752305006/html/

Vukićević, M., Marjanović, M., Pujević, V., & Jocković, S. (2019). The Alternatives to Traditional Materials for Subsoil Stabilization and Embankments. *Materials. 12*(18). *3018*. Obtenido de https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31540353/

Watanabe, K., Nakajima, S., & Fujii, K. (2020). Development of geosynthetic-reinforced soil embankment resistant to severe earthquakes and prolonged overflows due to tsunamis. *Soils and Foundations, 60*(6). *13771-1386.* Obtenido de https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038080620337203

Barrera, M., & Garnica, P. (2002). *Introducción a la Mecánica de Suelos no Saturados en vías Terrestres*. *Instituto Mexicano del Transporte*. *1-115.* Obtenido de https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt198.pdf

Cabezas, E., & Serrato, Y. (2019). *Evaluación de la resistencia de un suelo grueso reforzado con fibras de coco (cocotero, cocos nucifera)*. [Monografía de Grado, Universidad Piloto de Colombia]. Repositorio http://repository.unipiloto.edu.co/bitstream/handle/20.500.12277/6481/EVALUACION%20DE%20LA%20RESISTENCIA%20DE%20UN%20SUELO%20GRUESO%20REFORZADO%20CON%20FIBRAS%20DE%20COCO.pdf?sequence=7&isAllowed=y

Castro, L., & Guzmán, E. (2010). *Terraplenes Construidos con Arenas Eólicas*. 1-17. [Articulo, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio https://www.researchgate.net/publication/280446308

Fondo Europeo de Desarrollo Regional. (FEDER). (2013). *Transferencia Tecnológica relativa a materiales de construcción, incluyendo materiales marginales y residuos aprovechables. 1-165.* Obtenido de https://www.secegsa.gob.es/NR/rdonlyres/46F536DF-D8FD-4971-82F3-63B67643FD15/124975/Accion22TTIGEM_s.pdf

Flórez, A. (2019). *Propuesta metodológica de instrumentación y monitoreo para evaluar la estabilidad física de un depósito de relaves abandonado en chile*. [Memoria de Grado, Universidad de Chile]. Repositorio https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/174908/Propuesta-metodol%c3%b3gica-de-instrumentaci%c3%b3n-y-monitoreo-para-evaluar-la-estabilidad-f%c3%adsica-de-un-dep%c3%b3sito.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Fookes, P. (1997). *Suelos Residuales Tropicales*. *207*. Obtenido de https://www.academia.edu/1313528/SUELOS_RESIDUALES_TROPICALES

Geo–Technologies. (n.d.). *Refuerzo del terraplén del estanque de retención de residuos, Odisha, India*. Retrieved June 10, 2023, from https://www.prs-med.com/co/casestudies/terraplen-reforzado-del-estanque-de-retencion-de-residuos-india/

Gonzáles de Vallejo, L. I. (2002). *Ingeniería Geológica*. Geol 55. *Pearson Educación*.

Hernández, M. (2020). *Propuesta de distribución de una planta para un sistema de modelo de poliestireno expandido (EPS) aplicado en la industria de construcción*. [Tesis de Grado, Universidad Tecnológica de la Mixteca]. Repositorio http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/14119.pdf

Laterlite. (2015). *Geotecnia e infraestructuras soluciones ligeras y sólidas con arcilla expandida laterlite y hormigones ligeros estructurales*. Obtenido de www.laterlite.es

Mantilla, G., De la Torre, L., Gomez, C., Ordoñez, N., Ceballos, J., Euscategui, C., Pérez, P., Pérez, S., Martínez, N., Sanchez, R., Maldonado, N., Gaitan, jorge, Chavez, L., Chamorro, C., & Flórez, A. (1998). *Los suelos, estabili dad, productividad y degradación. El Medio Ambiente en Colombia. 6*, 1–50. Repositorio https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/18777

Ministerio de minas y energía. (2020). *Propuesta lineamientos técnicos de política de buenas prácticas para estandarizar los procesos de presas de relaves*. *Contrato*. *1-143*. Obtenido de https://www.minenergia.gov.co/static/cursos-mineria/src/document/PROPUESTA%20LINEAMIENTOS%20T%C3%89CNICOS%20DE%20POL%C3%8DTICA%20DE%20BUENAS%20PR%C3%81CTICAS%20-%20PRESAS%20DE%20RELAVES.pdf

Munirwan, R. P., Munirwansyah, Marwan, Ramadhansyah, P. J., & Kamchoom, V. (2020). *Performance of Coir Fiber Addition for Clay as a Sub-Grade for Pavement Design*. *712*(1). *1-9*. Obtenido de https://doi.org/10.1088/1757-899X/712/1/012009

Sebastián, J., Martínez, R., María, J., & Cuello, R. (n.d.). (2023). *Poliestireno expandido (EPS) en obras de ingeniería civil: experiencias frente a una problemática ambiental expanded polystyrene (eps) in civil engineering works: experiences addressing an environmental problem*. *Universidad Santo Tomas*. *1*. *1-13*. Obtenido de *https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/50145/2023juanrodriguez1.pdf?sequence=2*

Yepes, V. (2019). *Materiales que se pueden emplear en un terraplén*. PoliBlogs. Obtenido de https://victoryepes.blogs.upv.es/tag/terraplenes/#:~:text=El%20Pliego%20distingue%20en%20los,%2C%20n%C3%BAcleo%2C%20espald%C3%B3n%20y%20coronaci%C3%B3n.